INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Universidade Técnica de Lisboa

Tempos de Secagem de Betões Leves

Eduardo Jorge Silvestre Pinheiro

Dissertação para obtenção do grau de mestre em

Engenharia Civil

Júri

Presidente: António Moret Rodrigues

Orientador: Prof. Fernando Branco

Co-Orientador: Eng.º Manuel Vieira

Vogais: Prof. João Ferreira

Outubro de 2009

AGRADECIMENTOS

Ao professor Fernando Branco, meu respeitado orientador, que através do seu conhecimento, disponibilidade e simpatia, me motivou na realização deste trabalho.

Ao Eng. Manuel Vieira, meu respeitado co-orientador, que com o seu vasto conhecimento em betões e a sua capacidade de investigação, me orientou no desenvolvimento deste trabalho. Não posso deixar de referir a disponibilidade por ele prestada no acompanhamento da parte experimental.

Agradeço ao IST, nomeadamente aos responsáveis do Laboratório de Materiais de Construção, no qual desenvolvi parte do meu trabalho. Um especial agradecimento ao Sr. Leonel, técnico do laboratório, que com o seu conhecimento e simpatia me ajudou neste trabalho.

Não posso deixar de exprimir o meu apreço e gratidão ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), mais propriamente ao Núcleo de Betões, que disponibilizou equipamento, laboratórios e técnicos para a elaboração dos betões necessários à realização deste trabalho.

Um especial agradecimento ao Sr. Ferreira, Técnico de Laboratório, do LNEC, que com o seu conhecimento, disponibilidade e simpatia facilitou o desenvolvimento de várias etapas deste trabalho.

Sendo este trabalho uma etapa importante no meu percurso académico e pessoal, não o poderia terminar sem agradecer aos meus Pais, irmãos, namorada (que com a sua capacidade de trabalho me motivou e inspirou para o desenvolvimento deste), e a todos aqueles que de uma forma ou de outra ajudaram à sua concretização. A todos o meu obrigado.

RESUMO

Resumo: A presente dissertação tem como objectivo avaliar o tempo de secagem dos betões leves, constituídos por vários tipos de agregados.

Foram efectuados 3 tipos de betões em que variava apenas o tipo de agregado leve utilizado, sendo estes o granulado de cortiça expandido, a argila expandida e a pedra-pomes. Foi feito também um betão normal (betão de referência) com um agregado grosso de origem calcária.

Os betões foram sujeitos a dois ambientes distintos, para avaliar os diferentes tempos de secagem destes. Em todos os provetes foram feitas, ao longo de 1 mês, pesagens de modo a determinar a perda de água nos betões e a sua velocidade de evaporação. Foi também medida a variação do teor de água a diferentes níveis de espessura dos provetes para se determinar a evolução da secagem.

Palavras-chave: betão leve; agregados leves; camada de forma; substrato; massa volúmica; baridade; absorção de água; teor de água; humidade relativa.

ABSTRACT

Abstract: The present dissertation has the aim to evaluate the drying rate of lightweight concrete as a function of the coarse aggregate type.

Three different concrete were produced changing the type of lightweight aggregate that was used, which were granulated expanded cork, expanded clay and pumice stone. An ordinary concrete was also made (reference concrete) in which the coarse aggregate was crushed limestone.

The specimens were placed in two distinct environments, so that it could be possible to evaluate its influence on concrete's drying rate. All the specimens were weighed monthly in order to evaluate a loss of water on concrete and its evaporation rate. It was also measured the variation of water content at different depths of the specimens to determine the drying profile.

Keywords: lightweight concrete; lightweight aggregates; shape mould; substratum; density; loose bulk density; water absorption; water content; relative humidity.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. OBJECTIVOS 2

1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO 2

2. BETÕES LEVES 5

2.1. DEFINIÇÕES 5

2.2. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO 5

3. O ESTADO DA ARTE 9

3.1. A HUMIDADE NO BETÃO 9

3.1.1. Distribuição da humidade 11

3.1.2. Redistribuição da humidade após a colocação de um revestimento 13

3.2. PROCESSO DE SECAGEM 15

3.3. MÉTODOS PARA MEDIÇÃO DA HUMIDADE NO BETÃO 17

3.4. TEMPOS DE SECAGEM RECOMENDADOS 19

4. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS 21

4.1. ARGILA EXPANDIDA 22

4.1.1. Processo produtivo 23

4.2. GRANULADO DE CORTIÇA EXPANDIDA 24

4.2.1. Origem e constituição da cortiça 24

4.2.2. Processo produtivo 25

4.3. PEDRA-POMES 27

4.3.1. Formação 27

4.3.2. Aplicabilidade 28

4.4. CIMENTO 28

4.5. AGREGADO FINO 30

4.6. AGREGADO GROSSO 30

4.7. ÁGUA 31

4.8. CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS 31

4.8.1. Análise granulométrica 31

4.8.2. Baridade 35

4.8.3. Massa volúmica 36
4.8.4. Absorção de água 38
5. FORMULAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES ESTUDADAS 41
5.1. AMASSADURAS PRELIMINARES 41
5.2. AMASSADURAS FINAIS E CONFECÇÃO DE PROVETES 48
5.2.1. Equipamento 48
5.2.2. Procedimentos 50
5.2.3. Consistência do betão 50
5.2.4. Confecção e conservação dos provetes 51
6. ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS 55
6.1. PERDA DE ÁGUA NOS BETÕES 56
6.2. VELOCIDADE DE EVAPORAÇÃO 58
6.3. VARIAÇÃO DO TEOR DE ÁGUA 60
6.4. TEOR DE HUMIDADE FINAL EM DIFERENTES ESPESSURAS 71
6.5. HUMIDADE RELATIVA INTERIOR DO BETÃO 75
7. CONCLUSÕES 79
7.1. CONCLUSÕES GERAIS 79
7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 80
8. BIBLIOGRAFIA 81
ANEXOS 85
ANEXO 1 – Análise Granulométrica 87
ANEXO 2 – Baridade dos Agregados 90
ANEXO 3 – Massa Volúmica e Absorção de Água 90
ANEXO 4 – Resultados dos Ensaios dos Provetes 95
ANEXO 5 – Relatório de Peneiração (brita 0) 98

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – PANTEÃO DE ROMA [30] 6

FIGURA 2 – NAVIO U.S.S. SELMA [1] 7

FIGURA 3 – CONSTRUÇÃO DE NAVIOS EM BETÃO LEVE 7

FIGURA 4 – PALA DO PAVILHÃO DE PORTUGAL 8

FIGURA 5 – CAMADA DE BETONILHA DE ENCHIMENTO 8

FIGURA 6 – RELAÇÃO ENTRE O GRAU DE HIDRATAÇÃO E A HUMIDADE RELATIVA [40] 10

FIGURA 7 – FLUXO DE HUMIDADE [37] 10

FIGURA 8 – RELAÇÃO ENTRE SECAGEM E HUMIDADE [37] 10

FIGURA 9 – DISTRIBUIÇÃO DA HUMIDADE EM FUNÇÃO DA HUMIDADE RELATIVA (UR) E DO TEOR DE HUMIDADE (We), DE AMOSTRAS SECAS A 20 ºC E 40 %HR [37] 11

FIGURA 10 - DISTRIBUIÇÃO DA HUMIDADE EM FUNÇÃO DA HUMIDADE RELATIVA E DO TEOR DE HUMIDADE, DE AMOSTRAS SECAS A 20 ºC E 70 %HR [37] 12

FIGURA 11 – DISTRIBUIÇÕES DE HUMIDADE CALCULADAS EM FUNÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE E HUMIDADE RELATIVA COM UM TEMPO DE SECAGEM ENTRE 1 E 480 DIAS 12

FIGURA 12 – DISTRIBUIÇÃO DA HUMIDADE RELATIVA NUMA LAJE, SECA PELOS DOIS LADOS, ANTES E APÓS A SECAGEM E DEPOIS DE APLICADO O REVESTIMENTO [37] .. 13

FIGURA 13 – DISTRIBUIÇÃO DA HUMIDADE ANTES E APÓS A SECAGEM E APLICAÇÃO DO REVESTIMENTO PARA UM PISO DE BETÃO EXECUTADO DIRECTAMENTE SOBRE O SOLO [37] 14

FIGURA 14 – ORGANOGRAMA DE AGREGADOS LEVES [14] 21

FIGURA 15 – ARGILA EXPANDIDA 23

FIGURA 16 – ESQUEMA DE FABRICO DE ARGILA EXPANDIDA (PROCESSO LECA) EM FORNOS COAXIAIS 24

FIGURA 17 – DESCORTIÇAMENTO DO SOBREIRO EM PORTUGAL 25

FIGURA 18 – ESQUEMA DE FRABRICO DO AGLOMERADO DE CORTIÇA EXPANDIDO ... 26

FIGURA 19 – REGRANULADO DE CORTIÇA EXPANDIDA 27

FIGURA 20 – PEDRA-POMES 28

FIGURA 21 – BRITA 0 30

FIGURA 22 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA 32

FIGURA 23 – EQUIPAMENTO PARA DETERMINAR A BARIDADE 36

FIGURA 24 – DETERMINAÇÃO DA MASSA VOLÚMICA DA AREIA 37

FIGURA 25 – PICNÓMETROS COM AS AMOSTRAS DE ARGEX, AREIA E CORTIÇA, RESPECTIVAMENTE 37

FIGURA 26 – POROSIDADE VERSUS PERMEABILIDADE: a) Alta porosidade / baixa permeabilidade; b) poroso / alta permeabilidade; c) poroso / não permeável; d) baixa porosidade / alta permeabilidade 38

FIGURA 27 – DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA DA AREIA 39

FIGURA 28 – PRIMEIRA AMASSADURA PRELIMINAR (BR) 43

FIGURA 29 – ESPALHAMENTO DA ARGAMASSA PRODUZIDA 43

FIGURA 30 – AMASSADURAS EXPERIMENTAIS 44

FIGURA 31 – COLOCAÇÃO DA TOTALIDADE DE BETÃO PRODUZIDO NO RECIPIENTE DE 1L 45

FIGURA 32 – VIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO DA QUANTIDADE DE MATERIAL EM FALTA 45

FIGURA 33 – COLOCAÇÃO DE ÁGUA PARA DETERMINAR A QUNATIDADE DE VOLUME EM FALTA 46

FIGURA 34 – BETONEIRA ONDE SE EFECTUARAM AS AMASSADURAS 49

FIGURA 35 – CONE DE ABRAMS 49

FIGURA 36 – MESA VIBRATÓRIA 50

FIGURA 37 – VIBRAÇÃO DOS PROVETES 51

FIGURA 38 – APILOAMENTO DOS PROVETES DE BLGC 52

FIGURA 39 – PROVETES APÓS A MOLDAGEM 52

FIGURA 40 – PINTURA DOS PROVETES 53

FIGURA 41 – MOLDAGEM DO PROVETE COM ORIFICIOS 53

FIGURA 42 – PROVETE COM FUROS FEITOS APÓS A DESMOLDAGEM 54

FIGURA 43 – PESAGEM DOS PROVETES 56

FIGURA 44 – EVOLUÇÃO DA PERDA DE MASSA AO LONGO DO TEMPO 57

FIGURA 45 – VELOCIDADE DE EVAPORAÇÃO 59

FIGURA 46 – DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ÁGUA 61

FIGURA 47 – PROVETES COM SUPORTE CILINDRICO 61

FIGURA 48 – FACE DO PROVETE COM MANCHA CIRCULAR 62

FIGURA 49 – PROVETE MODELO 62

FIGURA 50 – PERDA DE ÁGUA AO LONGO TEMPO A DIFERENTES NÍVEIS DE ESPESSURA (BR) 63

FIGURA 51 – PERDA DE ÁGUA AO LONGO DO TEMPO A DIFERENTES NIVEIS DE ESPESSURA (BLGC).....64

FIGURA 52 – PERDA DE ÁGUA AO LONGO DO TEMPO A DIFERENTES NIVEIS DE ESPESSURA (BLAE) 65

FIGURA 53 – PERDA DE ÁGUA AO LONGO DO TEMPO A DIFERENTES NIVEIS DE ESPESSURA (BLPP) 66

FIGURA 54 - TEORES DE HUMIDADE APROXIMADOS AO LONGO DA ALTURA DOS PROVETES (ambiente normal, após 168 horas de secagem 69

FIGURA 55 - TEORES DE HUMIDADE APROXIMADOS AO LONGO DA ALTURA DOS PROVETES (ambiente ventilado, após 168 horas de secagem 70

FIGURA 56 – MEDIÇÃO DA HUMIDA RELATIVA INTERIOR DO BETÃO 75

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – CLASSES DE BETÕES LEVES 5

QUADRO 2 – TESTES PARA MEDIÇÃO DA HUMIDADE [44] 17

QUADRO 3 – RESUMO DE ALGUNS TESTES PARA MEDIÇÃO DA HUMIDADE RELATIVA E TEOR DE HUMIDADE (ADAPTADO DE [37]) 17

QUADRO 4 – TEMPOS DE SECAGEM RECOMENDADOS (ADAPATDO DE [37]) 19

QUADRO 5 – CLASSIFICAÇÃO DOS AGREGADOS SEGUNDO A BARIDADE [15] 22

QUADRO 6 – TIPOS DE CIMENTO (adaptado de [23]) 29

QUADRO 7 – CLASSES DE RESTÊNCIA (adaptado de [23]) 29

QUADRO 8 – PROPRIEDADES DO CIMENTO PORTLAND TIPO II/A-L 42,5 R [47] 29

QUADRO 9 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DA AREIA E DA ARGEX 33

QUADRO 10 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO GRANULADO DE CORTIÇA E DA PEDRA-POMES 33

QUADRO 11 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DA BRITA 0 34

QUADRO 12 – PARÂMETROS CARACTERIZADORES DOS AGREGADOS 35

QUADRO 13 – BARIDADE DOS AGREGADOS 36

QUADRO 14 – MASSA VOLÚMICA DOS AGREGADOS (Resultados após 24 horas) 38

QUADRO 15 – ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS AGREGADOS APÓS 24 HORAS 39

QUADRO 16 – COMPOSIÇÕES INICIAIS DOS BETÕES (relação A/C = 0,4) 41

QUADRO 17 – ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS AGREGADOS Às 2H 42

QUADRO 18 – COMPOSIÇÕES UTILIZADAS NAS PRIMEIRAS AMASSADURAS (A/C = 0,4) 42

QUADRO 19 – COMPOSIÇÕES UTILIZADAS NAS SEGUNDAS AMASSADURAS (A/C = 0,6) 44

QUADRO 20 – MASSA VOLÚMICA DOS AGREGADOS UTILIZADA NAS COMPOSIÇÕES FINAIS 46

QUADRO 21 – COMPOSIÇÕES FINAIS 46

QUADRO 22 – MASSA VOLÚMICA DOS BETÕES NO ESTADO FRESCO 47

QUADRO 23 – COMPOSIÇÕES APLICADAS NA PRODUÇÃO DOS BETÕES A ESTUDAR 48

QUADRO 24 – ABAIXAMENTO DOS BETÕES SEGUNDO O CONE DE ABRAMS 50

QUADRO 25 – TEMPOS E FREQUÊNCIAS DE VIBRAÇÃO DOS DIFERENTES BETÕES 51

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS.....34

GRÁFICO 2 – EVOLUÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS AGREGADOS AO LONGO DO TEMPO 40

GRÁFICO 3 – COMPARAÇÃO DAS MASSAS VOLÚMICAS DOS BETÕES.....47

GRÁFICO 4 – COMPARAÇÃO DA PERDA DE MASSA ENTRE OS BETÕES (ambiente normal).....58

GRÁFICO 5 – COMPARAÇÃO DA PERDA DE MASSA ENTRE OS BETÕES (AMBIENTE VENTILADO) 58

GRÁFICO 6 – COMPARAÇÃO DA VELOCIDADE DE EVAPORAÇÃO ENTRE OS BETÕES (ambiente normal).....60

GRÁFICO 7 – COMPARAÇÃO DA VELOCIDADE DE EVAPORAÇÃO ENTRE OS BETÕES (ambiente ventilado) 60

GRÁFICO 8 – COMPARAÇÃO DO TEOR DE ÁGUA ENTRE OS BETÕES – 0 cm (ambiente normal).....67

GRÁFICO 9 – COMPARAÇÃO DO TEOR DE ÁGUA ENTRE OS BETÕES – 0 cm (ambiente ventilado) 67

GRÁFICO 10 – COMPARAÇÃO DO TEOR DE ÁGUA ENTRE OS BETÕES – 4 cm (ambiente normal).....68

GRÁFICO 11 – COMPARAÇÃO DO TEOR DE ÁGUA ENTRE OS BETÕES – 4 cm (ambiente ventilado) 69

GRÁFICO 12 – TEORES DE HUMIDADE APROXIMADOS AO LONGO DA ALTURA DOS PROVETES (ambiente normal, após 336 horas de secagem) 70

GRÁFICO 13 - TEORES DE HUMIDADE APROXIMADOS AO LONGO DA ALTURA DOS PROVETES (ambiente ventilado, após 336 horas de secagem).....71

GRÁFICO 14 – TEOR DE HUMIDADE FINAL EM PROVETES DE BETÃO COM DIFERENTES ESPESSURAS APÓS 8 DIAS DE SECAGEM (ambiente normal) 72

GRÁFICO 15 - TEOR DE HUMIDADE FINAL EM PROVETES DE BETÃO COM DIFERENTES ESPESSURAS APÓS 8 DIAS DE SECAGEM (ambiente ventilado).....72

GRÁFICO 16 - TEOR DE HUMIDADE FINAL EM PROVETES DE BETÃO COM DIFERENTES ESPESSURAS APÓS 15 DIAS DE SECAGEM (ambiente normal) 73

GRÁFICO 17 - TEOR DE HUMIDADE FINAL EM PROVETES COM DIFERENTES ESPESSURAS APÓS 15 DIAS DE SECAGEM (ambiente ventilado).....73

GRÁFICO 18 - TEOR DE HUMIDADE FINAL EM PROVETES DE BETÃO COM DIFERENTES ESPESSURAS APÓS 30 DIAS DE SECAGEM (ambiente normal) 74

GRÁFICO 19 - TEOR DE HUMIDADE FINAL EM PROVETES COM DIFERENTES ESPESSURAS APÓS 30 DIAS DE SECAGEM (ambiente ventilado) 74

GRÁFICO 20 – HUMIDADE RELATIVA INTERIOR DO BETÃO (HR) À PROFUNDIDADE DE 4 CM 76

GRÁFICO 21 – HUMIDADE RELATIVA INTERIOR DO BETÃO (HR) À PROFUNDIDADE DE 8 CM 77

LISTA DE ABREVIATURAS

BR – betão de referência;

BLGC – betão leve de granulado de cortiça;

BLAE – betão leve de argila expandida;

BLPP – betão leve de pedra-pomes.

1. INTRODUÇÃO

“O betão é um material constituído pela mistura, devidamente proporcionada, de pedras e areia, com um ligante hidráulico, água e, eventualmente, adjuvantes. A propriedade que os produtos da reacção do ligante com a água têm de endurecer, confere à mistura uma coesão e resistência que lhe permite servir como material de construção.”[6]

O betão é o material de construção mais utilizado na indústria construtiva mundial devido a vários factores, tais como a sua constituição a partir de componentes produzidas por matérias-primas abundantes na Natureza, e principalmente devido às suas capacidades mecânicas. As vantagens deste material são tais que suplantam os seus aspectos negativos.

O elevado peso das estruturas em betão condiciona, de certo modo, o custo da obra, sendo que uma redução de cargas através da diminuição da massa volúmica do betão é uma das formas de optimizar a economia das construções, sendo esta a principal causa para o aparecimento dos betões leves.

Hoje em dia, cada vez mais se recorre ao betão leve não só a nível estrutural como para outros fins, daí que os estudos nesta área têm sofrido grandes desenvolvimentos já de há uns anos.

A aplicação de betão leve em pavimentos, mais propriamente em camadas de forma, é bastante frequente, devido à menor massa volúmica relativamente ao betão normal. Desta forma é possível utilizar uma camada de betão antes da colocação de um revestimento minimizando a carga nas estruturas. Contudo, um dos grandes problemas do betão é a sua velocidade de secagem, ou seja, a quantidade de água por unidade de tempo que demora a sair do betão. Sabendo que o processo de secagem é muito lento, é necessário conhecer um teor de água para evaporação admissível na superfície do substrato de betão de modo a que não ocorram problemas de aderência aquando da colocação de um revestimento.

“Na fase de construção a água é um elemento essencial para o fabrico de betões e argamassas que constituem na generalidade dos casos os elementos de suporte dos revestimentos de piso. Se não existir tempo suficiente para a secagem destes materiais, a humidade residual manifesta-se no revestimento de piso” [2]. Esta manifestação é causadora de inúmeras patologias como a degradação, descoloração, descolamento, delaminação empolamento e perda de aderência. Deste modo é de vital importância conhecer o processo de secagem do betão e a velocidade com que se processa, para que se possa evitar os problemas acima referidos.

Em todo este trabalho será referido o termo “tempo de secagem” como sendo o tempo que determinada quantidade de água demora a sair do betão.

Neste capítulo será abordado o objectivo deste trabalho bem como o seu o seu plano de desenvolvimento.

1.1. OBJECTIVOS

O desenvolvimento deste trabalho tem como finalidade aprofundar o conhecimento sobre as condições de humidade e o tempo de secagem que um pavimento deve ter para receber um revestimento sensível à água. Tal como o tema indica, o estudo irá focar-se nos pavimentos em betões leves, mais propriamente, na camada de enchimento ou regularização da laje onde assenta o revestimento. Esta camada, designada por betonilha de enchimento, ou camada de forma, é constituída por um betão de agregados leves. Serão formuladas diferentes argamassas em função dos tipos de agregados leves que se pretendem utilizar, sendo estes a argila expandida, o granulado de cortiça expandida e a pedra-pomes.

É de referir que o processo de secagem do betão se processa de forma lenta, o que torna muito difícil atingir uma secagem total do material em tempo útil.

O objectivo final deste trabalho será avaliar o comportamento de cada um dos agregados leves relativamente ao tempo de secagem da mistura.

1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está organizado em diferentes capítulos:

1 – Introdução

2 – Betões Leves

3 – O Estado de Arte

4 – Caracterização dos Materiais

5 – Formulação dos Betões Estudados

6 – Análise dos Resultados Experimentais

7 – Conclusões

8 – Bibliografia

O primeiro capítulo, apresenta uma introdução do trabalho em geral, tal como os seus objectivos e organização do documento.

O segundo, visa definir os betões leves de acordo com as normas em vigor, e apresenta em síntese a sua evolução ao longo do tempo.

O terceiro capítulo, tem como objectivo referir os estudos existentes no âmbito do tema deste trabalho. São referidas várias organizações, bem como diferentes investigadores, que desenvolveram trabalhos importantes para melhor compreender temas como a humidade no betão, o seu processo de secagem e o tempo recomendado para que seja atingido um nível de humidade admissível num substrato de betão.

No quarto, é apresentada a caracterização dos materiais a utilizar nas composições estudadas. São também descritos os agregados leves de acordo com a sua origem, formação, produção e aplicabilidade. Foram feitos ensaios aos três tipos de agregados leves utilizados e também à areia. Estes ensaios foram efectuados com o objectivo de conhecer as propriedades de cada material de modo a poder formar as composições desejadas. Foi determinada a análise granulométrica de cada agregado, além da baridade, da massa volúmica e da absorção de água.

No quinto, são determinadas as composições adoptadas para a confecção dos provetes, partindo de amassaduras experimentais até uma composição final. Neste capítulo são descritos os procedimentos adoptados nos processos de amassadura bem como a confecção e conservação dos provetes.

No sexto capítulo são apresentados, através de gráficos, os resultados obtidos, bem como os ensaios que os deram origem. É feita uma análise desses resultados onde são tiradas algumas conclusões sobre a perda de água ao longo do tempo nos diferentes betões, a sua velocidade de evaporação, o tempo de secagem e a humidade relativa interior de alguns provetes.

Por último, são apresentadas as conclusões finais sobre o trabalho em geral tendo em conta todo o seu conteúdo e os resultados obtidos. Neste capítulo, é também feita uma abordagem a desenvolvimentos que seriam interessantes investigar no futuro.

2. BETÕES LEVES

2.1. DEFINIÇÕES

O betão leve é definido segundo a NP EN 206 - 1 [3] como um betão com uma massa volúmica após secagem em estufa não superior a 2000 kg/m^3, total ou parcialmente fabricado com agregados de estrutura porosa. De acordo com essa norma é apresentado a seguir um quadro onde é possível observar as diferentes classes do betão leve segundo a sua massa volúmica.

QUADRO 1 – CLASSES DE BETÕES LEVES

Classe de massa volúmica	LC 1,0	LC 1,2	LC 1,4	LC 1,6	LC 1,8	LC 2,0
kg/m^3	901 a 1000	1001 a 1200	1201 a 1400	1401 a 1600	1601 a 1800	1801 a 2000

A principal distinção entre os betões leves e os betões normais é a menor massa volúmica que os leves apresentam, sendo também de realçar as suas características térmicas e de durabilidade [1].

De acordo com a sua composição, os betões leves podem ser de três tipos diferentes: betões com inertes leves; betões sem finos; betões celulares. No presente trabalho a referência a betão leve estará relacionada apenas com o betão de agregados leves.

A norma NP EN 13055 – 1 [4] define agregado leve como aquele que tem uma massa volúmica inferior ou igual a 2000 kg/m^3 ou uma baridade inferior ou igual a 1200 kg/m^3.

2.2. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

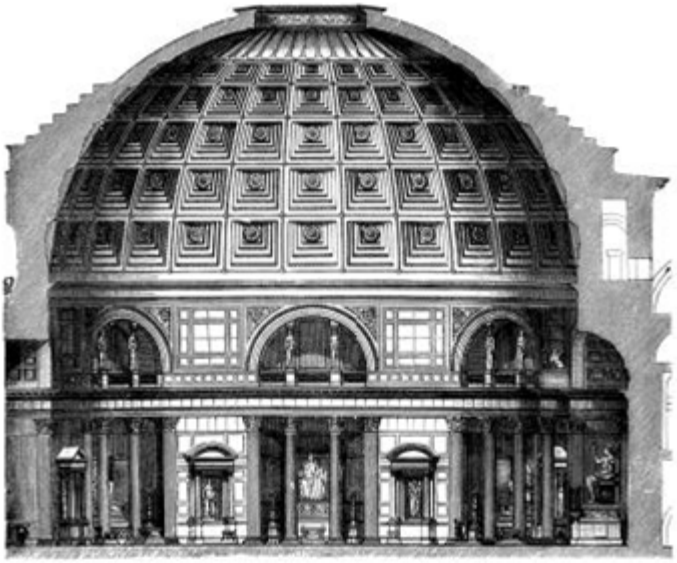
A utilização de materiais leves, como por exemplo a pedra-pomes, já vem desde a antiguidade onde se misturavam estes agregados com ligantes à base de cinzas vulcânicas e cal para obter um betão com menor massa volúmica que o normal.

O primeiro registo conhecido do uso de uma mistura de pedra-pomes com um ligante à base de cinzas volantes e cal, na construção, remonta à época pré-colombiana (1100 a.C.) na actual cidade de El Tajin, no México [1].

A capacidade que o Homem tem de conjugar os recursos que possui permite-nos, hoje, olhar para trás e ver obras de grande escala onde o conceito de betão leve foi implementado. Como

exemplo disso, temos o Panteão de Roma construído entre os anos 110 e 125 d.C. com uma enorme abóbada com cerca de 44m onde foi utilizado um betão leve com pedra-pomes [14].

FIGURA 1 – PANTEÃO DE ROMA [30]



Contudo, durante muitos séculos seguintes o betão teve uma utilização reduzida, sendo utilizado, quase por exclusivo, em fundações e em interiores de paredes de alvenaria [46].

Só no séc. XIX, com o desenvolvimento da produção e do estudo das propriedades do cimento, a utilização do betão cresce de forma significativa [46].

Desta forma começaram a surgir betões leves com diferentes tipos de composição conforme a sua aplicação. Isto aconteceu, porque com o fabrico industrial dos agregados leves consegue-se um maior controlo das características do mesmo e portanto uma maior uniformização, que não era possível nos agregados leves de origem natural. Essa capacidade de controlar as características dos agregados permitiu então o fabrico de betões mais resistentes, podendo estes vir a ser utilizados em elementos estruturais.

Na altura da 1ª guerra mundial, começou-se a utilizar betão leve na construção naval, sendo o navio "U.S.S. SELMA" (FIGURA 2), construído em 1919 com recurso ao betão leve de xisto expandido, o mais conhecido porque perdura até hoje.

FIGURA 2 – NAVIO U.S.S. SELMA [1]

Nesta altura, e até à 2ª guerra mundial, a principal aplicação deste material era mesmo a indústria naval, tendo sido construídos nos EUA 488 navios em betão leve [1].

FIGURA 3 – CONSTRUÇÃO DE NAVIOS EM BETÃO LEVE

Hoje em dia, devido ao melhor conhecimento científico, este material está cada vez mais desenvolvido e é utilizado em todo o tipo de construções, tais como pontes, edifícios de qualquer tipo, plataformas petrolíferas, entre outras.

Uma das grandes obras presentes no nosso País construída com recurso ao betão leve de argila expandida é a pala do pavilhão de Portugal, situado em Lisboa e construído para a Expo 98. Devido ao enorme vão de cerca de 65m, o recurso ao betão leve foi a solução escolhida para poder diminuir as cargas na estrutura.

FIGURA 4 – PALA DO PAVILHÃO DE PORTUGAL

Esta pala de betão pré-esforçado, que se baseia na ideia de uma folha de papel pousada em dois tijolos, da autoria do arquitecto português Álvaro Siza Vieira, consiste numa membrana parabólica com uma espessura de 20 cm e medindo em planta cerca de 65 metros por 50 metros. Esta estrutura encontra-se suspensa por cabos de aço ancorados, de ambos os lados, em lajes de ancoragem [32].

Contudo, a utilização mais comum do betão leve não é a estrutural, sendo cada vez mais utilizado para a reabilitação de estruturas existentes, nomeadamente pavimentos, devido às suas características de leveza e isolamento térmico e acústico. Hoje em dia, a maior parte dos pavimentos de edifícios são construídos com recurso ao betão leve para o enchimento de pisos (FIGURA 5) ou revestimento dos mesmos. É neste tipo de utilização que o presente trabalho se irá centrar.

FIGURA 5 – CAMADA DE BETONILHA DE ENCHIMENTO

3. O ESTADO DA ARTE

Neste capítulo será abordado o conhecimento que existe sobre a secagem do betão. Para tal, é necessário aprofundar temas como a humidade no betão e os factores que a influenciam, o modo como se dá a secagem dos betões, e os métodos que existem para determinar a perda de água e a humidade do interior do betão.

A dúvida sobre saber quando um betão está seco não é recente. Esta é uma questão a que muitos investigadores tentam dar resposta, mas este é um problema que depende de inúmeros factores, tais como o tipo de betão, as condições atmosféricas a que está sujeita a sua cura, a espessura da camada, entre outros [36]. Se perguntarmos a diferentes especialistas na matéria, tais como, um investigador dessa área ou um técnico especializado em colocação de pavimentos, deveríamos obter respostas semelhantes sobre o tempo de secagem, mas na realidade não é isso que acontece, pois cada um dará uma resposta diferente, devido aos factores acima mencionados [36].

3.1. A HUMIDADE NO BETÃO

Da quantidade da água utilizada para a produção do betão, parte combina-se com o cimento, tornando-se quimicamente ligada, outra parte permanece no sistema de poros, podendo designar-se por água livre [37].

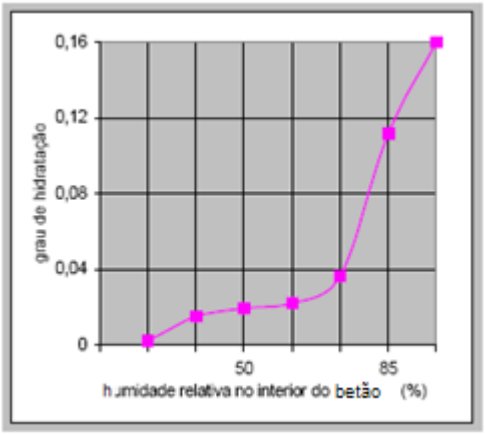
Após o período de cura do betão, parte da água continua a ser utilizada no processo de hidratação, combinando-se com o cimento não hidratado. A restante água livre pode ser evaporada, sendo este processo influenciado por vários factores, tais como, a idade do betão, a temperatura, o sistema de poros e a humidade relativa ambiente próxima do substrato [37].

Os processos de hidratação do cimento e secagem do betão, desenvolvem-se, simultaneamente, desde o momento em que existe a presença de água na mistura. A hidratação do cimento desempenha um papel importante no que se refere aos efeitos da humidade no interior do betão, e vice-versa. Como se pode ver na FIGURA 6, para um determinado teor de humidade[1], quanto maior o grau de hidratação, maior será o número de poros pequenos e consequentemente maior será a humidade relativa[2] no interior do betão.

[1] Teor de humidade é o peso da água em relação ao do betão, expresso em percentagem.

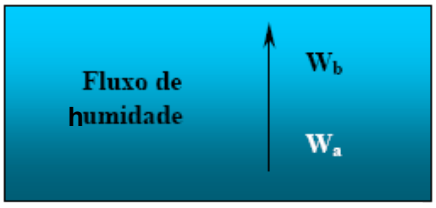
[2] Humidade relativa é definida como a relação entre a quantidade de vapor de água no interior do betão e a quantidade de vapor de água necessária para a saturação do interior do betão em uma determinada condição de pressão e temperatura, expressa em percentagem.

FIGURA 6 – RELAÇÃO ENTRE O GRAU DE HIDRATAÇÃO E A HUMIDADE RELATIVA [40]



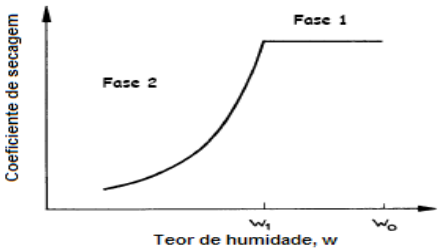
A secagem do betão é condicionada pela evaporação da água na superfície deste, ou seja, enquanto houver fluxo de humidade do interior para o exterior do betão (FIGURA 7) haverá evaporação de água e consequentemente secagem do material. No entanto, quando o teor de humidade atinge um determinado valor, o fluxo de humidade diminui e o coeficiente de secagem torna-se praticamente nulo (FIGURA 8). O coeficiente de secagem indica o volume de água evaporada na superfície, e é função do teor de humidade no interior do betão e da hidratação do cimento, uma vez que a estrutura de poros do betão altera-se com a hidratação [37].

FIGURA 7 – FLUXO DE HUMIDADE [37]



W – teor de humidade
$W_a > W_b$ direcciona o fluxo de humidade para a superfície, que cessa quando $W_a = 0$

FIGURA 8 – RELAÇÃO ENTRE SECAGEM E HUMIDADE [37]



Uma vez que a secagem do betão é um processo muito lento, a humidade estará presente neste durante muito tempo. Deste modo, a aplicação de revestimentos sensíveis à água deverá ser feita quando apenas uma parte dessa humidade for eliminada, sendo que a quantidade restante deverá permanecer na estrutura sem provocar danos. É importante conhecer o tipo de revestimento a aplicar, pois dependendo da sua sensibilidade à água, a humidade admissível na superfície do substrato de betão poderá variar, ou seja, quanto maior a sensibilidade do revestimento a aplicar menor terá de ser o nível de humidade no substrato, e vice-versa.

A humidade não se distribui uniformemente ao longo da espessura do substrato de betão, pois aumenta em profundidade, ou seja, junto à superfície em contacto com o ambiente apresenta

os menores valores, aumentando para o interior do betão. A aplicação de um revestimento impermeável sobre o substrato de betão, faz diminuir, ou até mesmo parar, o processo de secagem. Deste modo, a humidade no interior do betão tende a redistribuir-se em todas as camadas podendo atingir valores superiores aos aceitáveis na camada em contacto com o revestimento, provocando o descolamento e danificando o material aplicado.

Decorre, do exposto acima, a necessidade de se conhecer a maneira como se distribui a humidade ao longo da espessura do substrato de betão, de se definir o nível de humidade aceitável para a aplicação do revestimento e a selecção de métodos que permitem estimar o tempo de secagem dos betões até esse nível ser atingido.

3.1.1. Distribuição da humidade

É importante conhecer o modo como se distribui a humidade ao longo da espessura de uma camada de betão, pois, como já foi referido, essa distribuição não é uniforme. Quanto mais próximo da superfície em contacto com o ambiente, menor é a humidade interna do betão, aumentando em profundidade.

Vários estudos foram, e continuam a ser, elaborados, de modo a desenvolver um modelo de cálculo que permita conhecer a distribuição da humidade numa amostra de betão em função do teor de humidade e da humidade relativa. O departamento de materiais de construção do Instituto Lund de Tecnologia da Suécia desenvolveu um desses modelos computorizados. As figuras seguintes apresentam a comparação entre os resultados dos modelos e os valores medidos experimentalmente.

FIGURA 9 – DISTRIBUIÇÃO DA HUMIDADE EM FUNÇÃO DA HUMIDADE RELATIVA (HR) E DO TEOR DE HUMIDADE (We), DE AMOSTRAS SECAS A 20 ºC E 40 %HR [37]

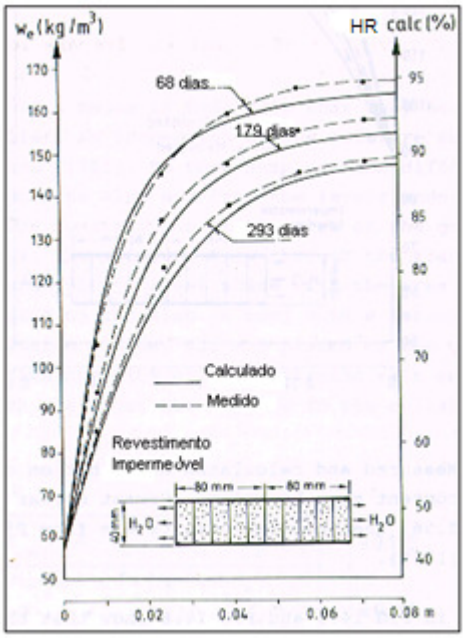
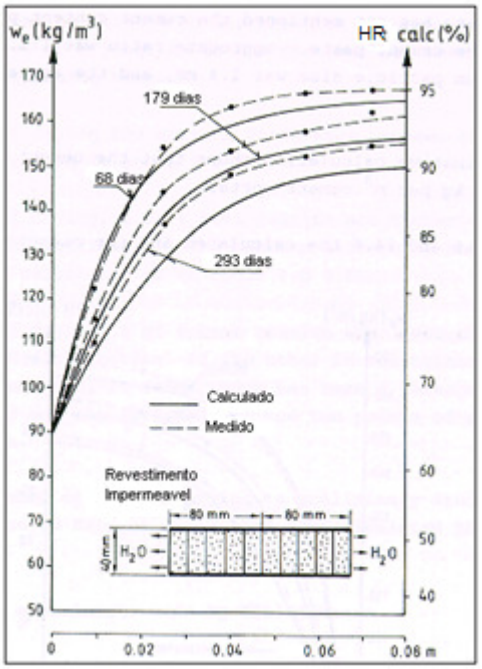
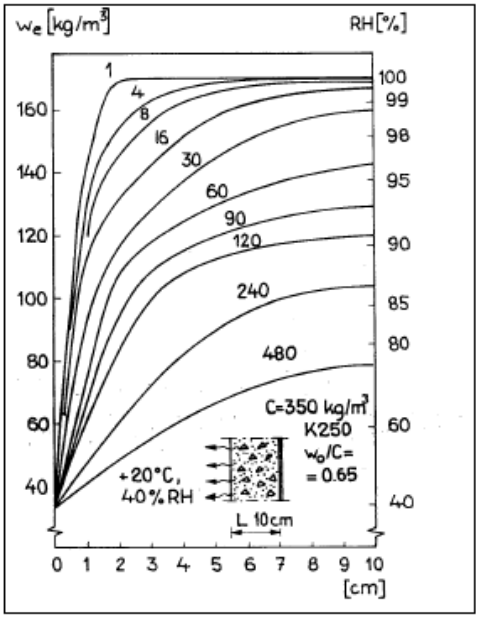


FIGURA 10 - DISTRIBUIÇÃO DA HUMIDADE EM FUNÇÃO DA HUMIDADE RELATIVA (HR) E DO TEOR DE HUMIDADE (We), DE AMOSTRAS SECAS A 20 ºC E 70 %HR [37]



Nilsson [41], calculou a distribuição da humidade numa laje de betão com 10cm de espessura (FIGURA 11), com tempo de cura de um mês antes de iniciar a secagem, com apenas uma superfície exposta ao ambiente com uma temperatura de 20 ºC e 40 % HR, para diferentes idades.

FIGURA 11 – DISTRIBUIÇÕES DE HUMIDADE CALCULADAS EM FUNÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE E HUMIDADE RELATIVA COM UM TEMPO DE SECAGEM ENTRE 1 E 480 DIAS



É possível verificar, através das figuras acima, o modo como se distribui a humidade. Apesar de haver diferenças entre os modelos, devido ao tempo de secagem e à maneira como é feita, nota-se claramente a não uniformidade da distribuição da humidade, conduzindo a um

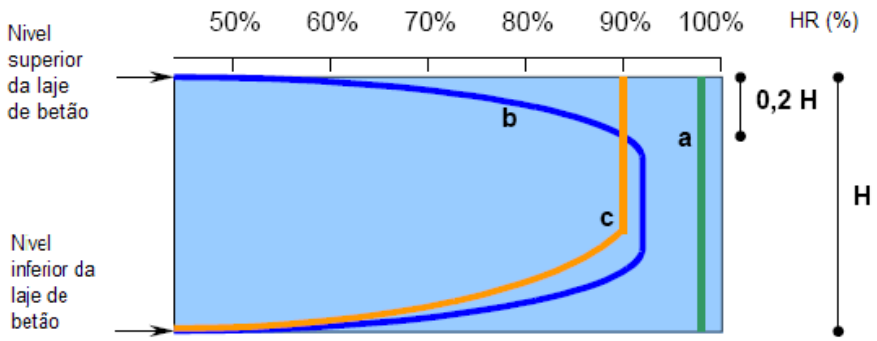
constante fluxo de humidade do interior para o exterior do betão, até, teoricamente, se atingir uma completa secagem do material. No entanto, essa secagem é, normalmente, interrompida, quase na totalidade, pela colocação de um revestimento impermeável, o que provoca uma redistribuição da humidade no seu interior.

3.1.2. Redistribuição da humidade após a colocação de um revestimento

De acordo com o que foi acima referido, é necessário conhecer o modo como ocorre a redistribuição da humidade após a colocação de um revestimento impermeável. Na figura seguinte é possível verificar a maneira como ocorre essa redistribuição até ser atingido um equilíbrio no fluxo de humidade [37][39][42].

A redistribuição da humidade, após a aplicação de um revestimento, condiciona o teor de humidade na interface revestimento-betão.

FIGURA 12 – DISTRIBUIÇÃO DA HUMIDADE RELATIVA NUMA LAJE, SECA PELOS DOIS LADOS, ANTES E APÓS A SECAGEM E DEPOIS DE APLICADO O REVESTIMENTO [37]



Em que:

a – perfil da distribuição da humidade antes da secagem;

b – perfil da distribuição da humidade após a secagem;

c – perfil da redistribuição da humidade após a aplicação do revestimento superior;

H – espessura da laje;

0,2 H – profundidade equivalente.

Existe uma profundidade, medida a partir da superfície da laje, onde a humidade, antes de ser colocado o revestimento, é igual à humidade registada na superfície da laje após ser revestida.

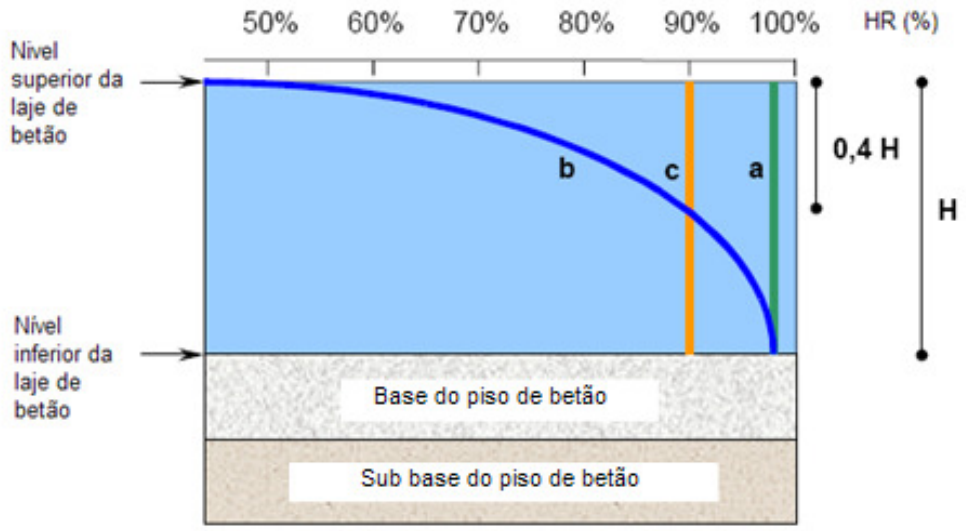
Esta profundidade denomina-se por "*profundidade equivalente*" e varia consoante a secagem da laje ocorra apenas por um lado ou por ambos [37][39].

Na FIGURA 12, está representada uma laje com secagem por ambos os lados, sendo a "*profundidade equivalente*" igual a 0,2H, em que H é a espessura da laje. Este é um exemplo típico das lajes dos pisos que não estão em contacto com o solo.

É importante realçar que após a colocação do revestimento superior a laje continua o seu processo de secagem através da face inferior, havendo uma redistribuição da humidade como se pode ver na FIGURA 12. Nessa mesma figura verifica-se, através da curva *c,* que após a colocação do revestimento a humidade torna-se constante até uma certa profundidade. No caso apresentado a seguir, em que a secagem é apenas feita por um lado, isso já não acontece da mesma forma, pois com a colocação do revestimento ocorre a redistribuição da humidade mantendo-se essa constante ao longo de toda a espessura da laje, como se pode ver através da curva *c* da FIGURA 13.

No caso da secagem da laje ocorrer apenas por um lado, como acontece nas lajes em contacto com o solo, a "*profundidade equivalente*" aumenta passando de 0,2H para 0,4H, como se pode ver na figura seguinte [37][39].

FIGURA 13 – DISTRIBUIÇÃO DA HUMIDADE ANTES E APÓS A SECAGEM E APLICAÇÃO DO REVESTIMENTO PARA UM PISO DE BETÃO EXECUTADO DIRECTAMENTE SOBRE O SOLO [37]



Em que:

a – perfil da distribuição da humidade antes da secagem;

b – perfil da distribuição da humidade após a secagem;

c – perfil da redistribuição da humidade após a aplicação do revestimento;

H – espessura da laje;

0,4 H – profundidade equivalente.

É de extrema importância conhecer como ocorre a redistribuição da humidade após a colocação de um revestimento sensível à água, para que não ocorram problemas na interface entre o substrato e o revestimento. Para tal, é necessário medir com eficiência a humidade na base onde assenta o revestimento de modo a saber o tempo que demora a atingir um nível de humidade admissível.

3.2. PROCESSO DE SECAGEM

A caracterização do processo de secagem do betão tem sido alvo de diversos estudos experimentais por parte de vários investigadores. Os métodos utilizados para tal, podem ser classificados em três grupos: verificação da alteração do peso dos betões, métodos destrutivos (como por exemplo introdução de sondas no interior do betão para monitorizar a humidade) e medição da humidade relativa/quantidade de água [43].

Segundo a referência bibliográfica [43], são transcritas a seguir as conclusões dos estudos realizados por alguns investigadores sobre o processo de secagem do betão.

"Parrot investigou os perfis de humidade no betão, resultantes da secagem, utilizando duas técnicas diferentes, tendo demonstrado que a variação da humidade relativa de diferentes materiais cimentícios pode ser representada, quer por uma função hiperbólica, quer por uma função exponencial.

Selih et al investigaram experimentalmente as alterações do teor de humidade no decurso do processo de secagem em betões de agregados leves. Verificaram dois estágios de secagem: um período inicial em que a velocidade de secagem foi constante e um segundo período em que se verificou um decréscimo na velocidade de secagem. Para os betões de agregados leves estudados, verificaram que o período inicial ocorreu, de um modo geral, entre os 3 e os 7 dias.

Akita et al quantificaram experimentalmente (por processos destrutivos) a transferência de humidade, medindo as variações da quantidade de água no interior de provetes prismáticos de betão, sujeitos a secagem unidireccional e a secagem por todas as faces. Em idades pré determinadas, os provetes foram seccionados e secos para determinação da quantidade de água. Estes investigadores confirmaram ser válida a utilização de uma equação não-linear de

difusão para a previsão da transferência de humidade, e concluíram que a relação entre a quantidade de água do betão e a humidade relativa é fortemente influenciada pela composição do betão.

Merikallio et al, estudaram comparativamente a secagem de três betões de agregados leves (argila expandida) e de dois betões de agregados correntes e mediram a humidade relativa no interior do betão durante o processo de secagem. Concluíram que os betões de argila expandida atingem os 90% de humidade relativa interior mais rapidamente que os betões de agregados correntes. A diferença entre tempos de secagem dos betões com argila expandida e dos betões correntes aumenta com a espessura do elemento.

Kim et al, mediram a humidade relativa interna do betão em provetes submetidos a secagem unidireccional. A variação da humidade relativa interna devida à auto-dissecação foi medida em provetes selados. Constataram que a humidade relativa no interior dos provetes difere significativamente em função da distância à superfície exposta. A variação da humidade relativa interior é maior a distâncias próximas da superfície do que nas zonas interiores do betão, tendo sido observadas menores variações em provetes com elevada relação água-cimento.

West et al apresentaram um modelo de elementos finitos para a previsão das alterações do teor de humidade do betão, ao longo do tempo, durante a secagem e após a aplicação de um revestimento de piso. O modelo teve em conta a espessura da laje, a relação águacimento, as condições ambientais e de fronteira. Verificaram que os parâmetros que mais influenciam a migração da humidade durante a secagem, são a relação água-cimento, a espessura da laje e as condições ambientais.

Jiang et al, estudaram a distribuição da humidade relativa de pastas de cimento com diferentes relações água-cimento e adições minerais em condições isotérmicas de secagem. Os resultados mostraram que a diminuição da humidade relativa interna, nas pastas de cimento com razões água-cimento superiores a 0.4, é fundamentalmente afectada pela difusão da humidade. Para razões água-cimento inferiores a 0.4, o processo é também influenciado pela autodissecação.

El-Dieb investigou a retenção de água e a hidratação do betão contendo agentes de cura. Foram medidos, ao longo do tempo, a perda de peso e a humidade relativa interna do betão com agentes de cura e comparados com os do betão convencional. Verificou-se que a retenção de água, determinada pela perda de peso com o tempo, em betões com incorporação de agentes de cura é superior à do betão convencional.

Babu et al estudaram o efeito da dimensão dos agregados de poliestireno na resistência e nas características da migração da humidade do betão leve. Os betões com granulados de EPS de

menor dimensão exibiram maior resistência à compressão. O estudo demonstrou que o betão de EPS contendo grânulos de maior dimensão e com maiores volumes de EPS, apresenta maior migração de humidade e mais elevada absorção" [43].

3.3. MÉTODOS PARA MEDIÇÃO DA HUMIDADE NO BETÃO

Existem vários tipos de testes para avaliar o nível de humidade num substrato de betão, podendo estes fornecer dados tanto qualitativos como quantitativos. Contudo os principais testes para avaliar o nível de humidade estão descritos na norma ASTM E 1097-97 [44] e são classificados como quantitativos e qualitativos, como se pode ver no quadro seguinte.

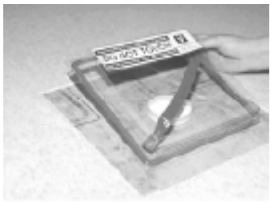
QUADRO 2 – TESTES PARA MEDIÇÃO DA HUMIDADE [44]

Testes qualitativos	Testes quantitativos
Folha plástica	Resistência eléctrica
Placa colada	Impedância eléctrica/Humidímetro
Cloreto de cálcio qualitativo	Cloreto de cálcio anidro
Teste matemático	Humidade relativa

Em seguida é apresentado um quadro resumo de alguns dos testes acima referidos descrevendo a maneira como funcionam e os resultados obtidos.

QUADRO 3 – RESUMO DE ALGUNS TESTES PARA MEDIÇÃO DA HUMIDADE RELATIVA E TEOR DE HUMIDADE (ADAPTADO DE [37])

Teste	Tipo	Duração	Descrição	Avaliação	Resultados	Foto
Folha plástica	Qualitativo	16 ou 24 h	Cobrir o local d medição com uma manta plástica. (46x46cm), fixa nas extremidades com fita adesiva	Visual	Após constatação de que não haja humidade condensada sob a folha ou a superfície do betão não esteja endurecida.	
Placa colada	Qualitativo	72h	Aplica-se 1 m^2 de revestimento seguindo-se as recomendações do fabricante.	Visual e esforço físico	Se a colagem estiver fraca e o adesivo húmido ou pegajoso o revestimento não deve ser aplicado	

Resistência eléctrica	Quantitativo	Imediato	Mede a condutividade eléctrica entre dois eléctrodos colocados na superfície do betão ou em perfurações executadas com 25mm de profundidade.	O teor de humidade que é o peso da água em relação ao do betão, expresso em percentagem, varia com a condutividade eléctrica, sendo a conversão dos valores indicada pelo fabricante do medidor.	De acordo com a indicação do fabricante do revestimento, normalmente inferior a 10%.	
Impedância eléctrica	Quantitativo	Imediato	Mede a impedância de um sinal eléctrico de baixa frequência emitido entre dois eléctrodos no medidor colocado sobre a superfície do betão.	O teor de humidade do betão varia inversamente proporcional à impedância eléctrica, sendo a conversão dos valores indicada pelo fabricante.	De acordo com a indicação do fabricante do revestimento, normalmente inferior a 10%.	
Cloreto de cálcio anidro (TCCA)	Quantitativo	72h	Coloca-se uma pastilha de cloreto de cálcio anidro sobre a superfície de betão e mede-se o ganho de peso após 72h.	Calcula-se a taxa de emissão de vapor de humidade que expressa o volume de humidade emitido através da superfície do betão durante o teste, conforme indicação do fabricante do kit de teste.	De acordo com a indicação do fabricante do revestimento, variando entre 3 a 5 lbs/1000 pés quadrados.24h ou 170 e 280 µg/s.m^2.	
Humidade relativa	Quantitativo	Imediato	Executam-se perfurações no betão, com antecedência de 72h antes da primeira medição, ou coloca-se moldes cilíndricos no decorrer da betonagem, em que serão realizadas as medições com uso de higrómetro em diferentes profundidades do betão, normalmente a 0,2 e 0,4 da espessura do substrato.	A humidade relativa interna do betão, que é a quantidade de vapor de água no ar no instante da medição em relação à de saturação do ar, expressa em percentagem.	De acordo com a indicação do fabricante do revestimento, ou estabelecido em norma. Variando de 75% a 90%.	

A condição de humidade num substrato de betão pode ser expressa na forma de "*teor de humidade*", "*humidade relativa*" ou "*taxa de emissão de vapor*", dependendo do método utilizado para a sua avaliação.

3.4. TEMPOS DE SECAGEM RECOMENDADOS

Como foi anteriormente referido, a secagem do betão é um processo muito lento, sendo, deste modo, apenas necessário que se elimine parte da água para que não ocorram problemas aquando da colocação de um revestimento sensível à humidade.

Diversas organizações internacionais têm procurado dar respostas à questão *"quanto tempo demora um betão a secar?".* Infelizmente as respostas, como seria de esperar, não são unânimes, devido aos múltiplos factores que influenciam o tempo de secagem, tais como as condições ambientes de humidade e temperatura, relação água/cimento e espessura do substrato.

Contudo, é apresentado a seguir um quadro resumo dos tempos de secagem adoptados por algumas organizações para que o substrato de betão atinja um nível de humidade satisfatório, podendo os valores indicados não serem conclusivos para determinados casos.

QUADRO 4 – TEMPOS DE SECAGEM RECOMENDADOS (ADAPATDO DE [37])

ORGANIZAÇÃO	TEMPO DE SECAGEM RECOMENDADO
ASTM - American Society for Testing Materials	6 semanas a 6 meses
CRI - Carpet and Rug Institute	12 a 16 semanas para aplicação de revestimentos têxteis de borracha
WFC - World Floor Covering Association	mínimo de 28 dias (critério pouco rigoroso)
RFCI - Resilient Floor Covering Institute	mínimo de 6 semanas para qualquer tipo de revestimento sensível à humidade
PCA - Portland Cement Association	mínimo de 8 semanas

Em Portugal, o LNEC [45] recomenda um teor de água máximo admissível da base de assentamento, no momento da aplicação do revestimento, de 2,5 % em relação ao peso do material seco. Para camadas de regularização com espessuras inferiores a 40 mm o tempo de secagem não deverá ser inferior a 4 semanas no Verão e 6 semanas no Inverno. Estes valores devem ser acrescidos, no mínimo, de uma semana por cada 10 mm além dos 40 da camada de regularização.

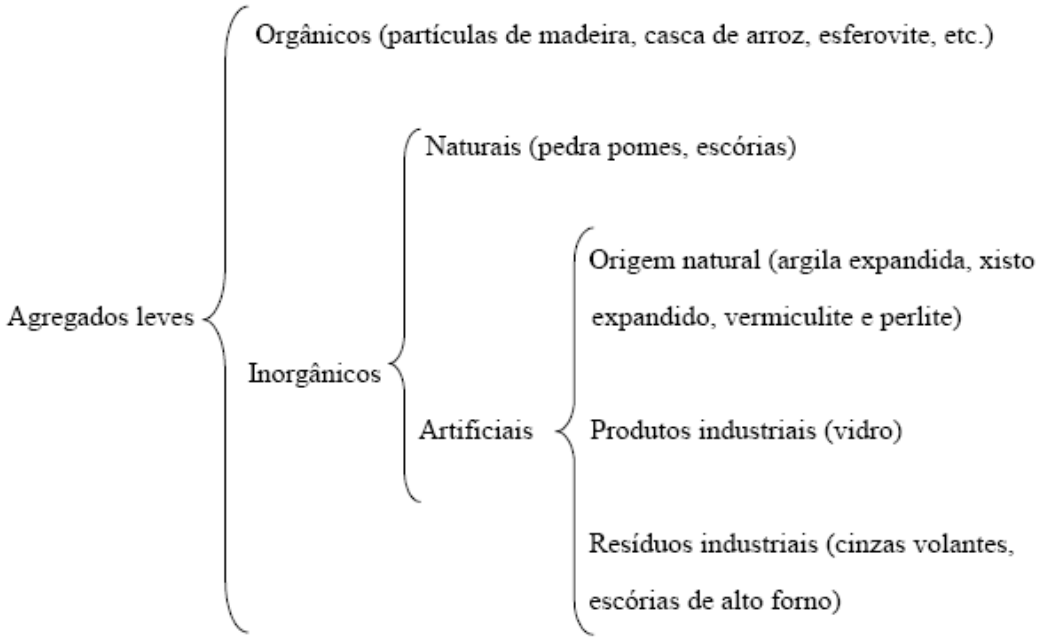
4. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Em comum, todos os agregados leves têm como característica principal a estrutura porosa que resulta numa baixa massa volúmica. No entanto, conforme a sua origem, apresentam características inerentes que podem afectar em maior ou menor escala as propriedades do betão.

Os agregados leves são classificados em naturais e artificiais sendo os primeiros, obtidos através da extracção directa em jazidas e do aproveitamento de rochas ígneas/vulcânicas. Os principais agregados leves enquadrados nessa categoria são de origem vulcânica, como a pedra-pomes, os tufos e as cinzas vulcânicas. Quanto aos agregados artificiais, enquadram-se os agregados obtidos por processos industriais e alguns resíduos industriais.

Os agregados leves podem ser caracterizados segundo a sua origem, baridade ou massa volúmica. Desta forma é apresentado a seguir um organograma (FIGURA 14) que caracteriza os agregados leves segundo a sua origem [14], e um quadro (QUADRO 5) que os caracteriza segundo a sua baridade [15].

FIGURA 14 – ORGANOGRAMA DE AGREGADOS LEVES [14]


Agregados leves
Orgânicos (partículas de madeira, casca de arroz, esferovite, etc.)
Inorgânicos
Naturais (pedra pomes, escórias)
Artificiais
Origem natural (argila expandida, xisto expandido, vermiculite e perlite)
Produtos industriais (vidro)
Resíduos industriais (cinzas volantes, escórias de alto forno)

QUADRO 5 – CLASSIFICAÇÃO DOS AGREGADOS SEGUNDO A BARIDADE [15]

Classificação do agregado	Baridade (kg/m^3)	Exemplos de agregados	Aplicação e designação do betão
Ultraleve	< 300	Poliestireno extrudido Vermiculite Perlite espandida Vidro expandido	Com funções estritamente de isolamento térmico e sem funções de resistência
Leve	300 a 1200	Argila expandida Xisto expandido Escória de alto-forno expandida Cinzas volantes sinterizadas Pedra-pomes	Com funções de isolamento térmico, com funções de resistência (betão estrutural) e diminuição do peso próprio
Denso (normal)	1200 ou 950 a 1700	Areia Godo Rocha britada	Normal, com função de resistência (betão, estrututral)
Extradenso	> 1700	Limonite Magnetite Barite	Com funções de protecção em centrais nucleares e com funções resistentes

Neste capitulo apresentam-se os agregados utilizados, bem como algumas das suas propriedades.

4.1. ARGILA EXPANDIDA

A argila expandida é um agregado leve que se pode apresentar tanto na forma angulosa como na forma esférica dependendo do processo de fabrico. Exteriormente, este material apresenta uma estrutura pouco rugosa, dura e de cor acastanhada. No interior dessa casca, encontra-se uma estrutura alveolar que tem origem na formação de gases que se expandem no seu interior devido às altas temperaturas a que são submetidas as argilas no interior dos fornos [10][30]. Na figura seguinte é possível verificar algumas das características já referidas, tais como a cor e a forma das partículas.

FIGURA 15 – ARGILA EXPANDIDA

Para a formação deste material existem diferentes tipos de processos de fabrico, de preparação da matéria-prima e de cozedura. No entanto, os processos referidos a seguir são os utilizados em Portugal para a obtenção da argila expandida do tipo LECA.

A argila expandida utilizada neste estudo é da marca Argex 2-4.

4.1.1. Processo produtivo

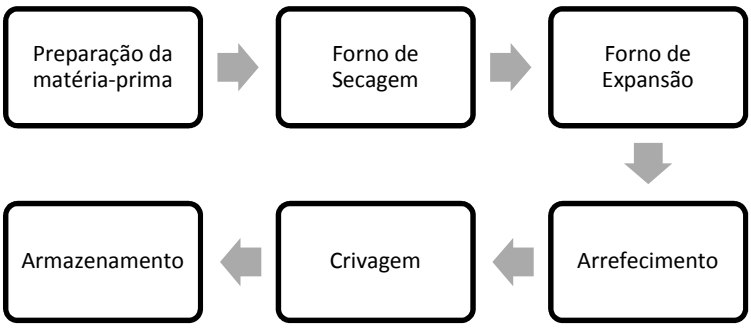
A produção da argila expandida, inicia-se com a extracção da matéria-prima no barreiro, através de equipamento mecânico adequado, seguindo para a fábrica onde as argilas são seleccionadas e preparadas para a conformação [10]. A argila é misturada com materiais que aumentam a sua expansibilidade (p.ex: carvão, pirite, dolomite, etc.), sendo a mistura introduzida no forno de secagem para passar posteriormente ao forno de expansão. Esses fornos são geralmente cilíndricos rotativos, com um eixo ligeiramente inclinado e um comprimento entre os 30 e os 60 metros [7]. A mistura, ao ser introduzida no forno de secagem, vai ser gradualmente seca a temperaturas a rondar os 800 ºC, sendo no forno de expansão (forno rotativo) que ocorre a fusão da argila a uma temperatura próxima dos 1200 ºC. Durante essa elevação de temperatura, dá-se uma libertação de gases que causa o aparecimento de poros no interior do material piroplástico [1]. Após esta cozedura, os agregados caem numa grelha onde se dá o arrefecimento, sendo posteriormente crivados e armazenados por classes. Na FIGURA 16 está representado um esquema que resume o processo de fabrico da argila expandida.

Através deste processo, a argila transforma-se em grânulos esféricos de granulometria variada e núcleo formado por uma estrutura alveolar, envolta por uma casca cerâmica vitrificada,

resistente e com baixa permeabilidade, que confere ao agregado uma porosidade fechada e diminui significativamente a absorção de água.

É de referir que a capacidade de expansão da argila depende, principalmente, das características granulométricas, das características químicas e da composição mineralógica da matéria-prima.

FIGURA 16 – ESQUEMA DE FABRICO DE ARGILA EXPANDIDA (PROCESSO LECA) EM FORNOS COAXIAIS



4.2. GRANULADO DE CORTIÇA EXPANDIDA

A cortiça é um material natural, orgânico e leve que, desde a antiguidade, tem sido utilizada pelo Homem com diferentes fins, tais como a construção a vedação de vinhos ou até mesmo a aeronáutica [33].

A indústria corticeira consome, anualmente, mais de 280 000 toneladas de cortiça. No entanto, verifica-se que, entre 20 e 30% da matéria-prima recebida nas unidades de transformação é rejeitada, sob a forma de pó de cortiça [11]. Deste modo, a indústria corticeira tem vindo a demonstrar interesse pelo aproveitamento destes subprodutos e suas aplicações no sector da construção civil, como por exemplo a sua utilização como isolante térmico e acústico ou como agregado leve.

O granulado de cortiça expandida utilizado neste estudo é da marca Sofalca da classe 2-9 mm.

4.2.1. Origem e constituição da cortiça

A cortiça é obtida através da casca do sobreiro (Quercus Suber L.), um tipo de árvore nativa da zona Mediterrânica. O sobreiro é uma árvore que requer humidade e solos relativamente profundos e férteis, embora tolere temperaturas mais elevadas em alguns meses do ano. Estas condições, entre outras, fazem de Portugal o principal produtor de cortiça a nível mundial.

FIGURA 17 – DESCORTIÇAMENTO DO SOBREIRO EM PORTUGAL

Este material é constituído essencialmente por suberina, substância que representa cerca de 40% do seu peso seco, lenhina (± 20%), polissacarídeos (± 20%) e outros produtos (± 15%) [13] [33]. Esta composição química, em conjunto com a sua particular estrutura celular, proporciona à cortiça um excelente comportamento térmico e acústico, fazendo desde material uma excelente solução para a indústria da construção.

O facto de ser um produto naturalmente renovável com características naturais, proporciona vantagens ecológicas e de sustentabilidade que nos dias de hoje é imperioso alcançar [5].

Contudo, desde o primeiro descortiçamento, onde é retirada a primeira cortiça que toma o nome de *Virgem*, até à formação do granulado de cortiça expandida que é utilizado na indústria da construção, vão inúmeras etapas, como se pode ver na FIGURA 18 do ponto seguinte.

4.2.2. Processo produtivo

O aglomerado de cortiça expandida é um produto em que a aglutinação dos grânulos da matéria-prima se efectua exclusivamente em consequência da expansão volumétrica e da exsudação das resinas naturais da cortiça, por acção da temperatura transmitida pelo vapor de água. É assim produzido um aglomerado unicamente constituído por cortiça, razão pela qual também se designa por aglomerado puro de cortiça [12] [33].

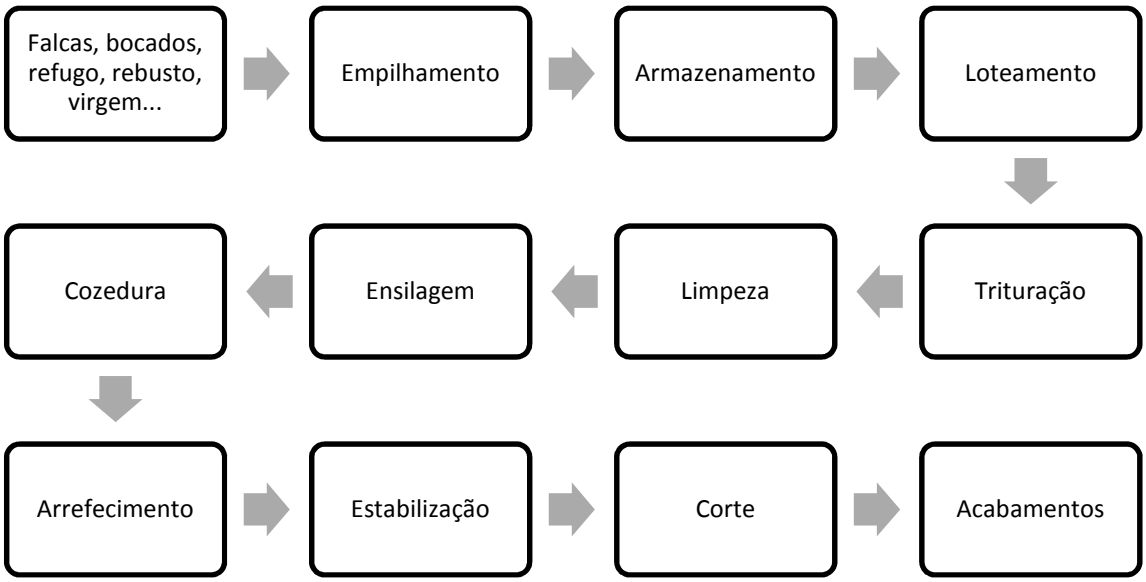
Internacionalmente e em documentação técnica actual o aglomerado de cortiça expandida é com frequência referenciado pela sigla ICB, da denominação inglesa Insulation Cork Board.

Após a pré-preparação da matéria-prima, esta é triturada, limpa de impurezas, ensilada e seca (ou previamente seca), até se alcançar um teor ponderal de água ideal para a operação de cozedura.

Seguidamente a aglomeração dos grânulos de cortiça natural processa-se num autoclave, no qual é injectado vapor de água aquecido a temperaturas superiores a 300ºC com pressões à volta de 0,4 MPa sensivelmente durante 20 minutos, o que irá provocar uma exsudação das resinas da cortiça e uma sobrepressão provocada pelo aumento de volume dos grânulos em cerca de 30%. Estes dois factores provocam conjuntamente a inter-aglutinação do material [19]. Neste método forma-se um bloco paralelepípedo de aglomerado de cortiça expandida, funcionando o próprio autoclave como molde.

Após o completo arrefecimento e a estabilização dimensional, seguem-se as fases de corte e de acabamento, em que os blocos são seccionados em placas, é acertada a esquadria destas e, eventualmente, são submetidas a uma lixagem da superfície para efeitos decorativos.

FIGURA 18 – ESQUEMA DE FRABRICO DO AGLOMERADO DE CORTIÇA EXPANDIDO



As fatias sobrantes das fases acima referidas, em conjunto com blocos e pranchas defeituosas, são “regranuladas” obtendo-se o regranulado de cortiça expandida utilizado no presente trabalho (FIGURA 19).

FIGURA 19 – REGRANULADO DE CORTIÇA EXPANDIDA

4.3. PEDRA-POMES

A pedra-pomes é uma rocha vulcânica de muito baixa densidade que é utilizada pelo Homem, desde a antiguidade, como agregado leve na construção. Como exemplo de construções onde a utilização deste material foi extremamente importante para a formulação de betão leve, tem-se o Panteão de Roma.

Como já foi referido, a pedra-pomes tem origem vulcânica, podendo ser encontrada em qualquer parte do mundo. No nosso País, este material tem predominância no arquipélago dos Açores devido à origem vulcânica das suas ilhas. Mundialmente, vários países produzem produtos com origem na pedra-pomes, sendo o maior produtor a Itália [20].

4.3.1. Formação

A pedra-pomes forma-se durante erupções vulcânicas explosivas quando lava líquida muito rica em gases é projectada na atmosfera, formando pedaços de espuma constituídos por material lávico recheado por bolhas de gás que aumentam rapidamente de volume com a redução da pressão aquando da saída da lava para a atmosfera [20]. Estas bolhas são aprisionadas na rocha formada, pelo rápido arrefecimento da lava, transformando cada fragmento num elemento repleto de bolhas de dimensão variável, a maior parte das quais sub-microscópica.

FIGURA 20 – PEDRA-POMES

4.3.2. Aplicabilidade

A principal característica, deste material, como agregado leve é a sua baixa densidade, de tal forma que é comum ter densidade inferior à da água, o que a transforma na única rocha que flutua [20]. A durabilidade deste material é também reconhecida como uma importante vantagem pois devido a esta característica é possível existirem construções com mais de dois mil anos de existência [21].

Porém, a evolução industrial permitiu a criação de materiais, através de processos mecânicos, para agregados leves, com melhores características mecânicas, o que fez com que a utilização da pedra-pomes como agregado leve fosse caindo em desuso ao longo do tempo.

Em Portugal, a utilização da pedra-pomes na construção nunca foi uma solução viável, pois como já foi referido, apenas nas ilhas existe este material, não sendo, deste modo, rentável a sua aplicação.

4.4. CIMENTO

O cimento é um dos principais constituintes do betão. Em conformidade com a norma NP EN 197-1 [23] os cimentos podem ser de vários tipos dependendo da sua composição (QUADRO 6), e de várias classes de resistência (QUADRO 7).

QUADRO 6 – TIPOS DE CIMENTO (adaptado de [23])

TIPOS DE CIMENTO	CONSTITUINTES
CEM I	Clinquer 95 - 100 %
	Outros constituintes 0 - 5 %
CEM II/B-L	Clinquer 65 79 %
	Calcário 21 - 35 %
CEM II/A-L	Clinquer 80 - 94%
	Calcário 6 – 20 %
	Outros constituintes 0 - 5 %
CEM IV/A	Clinquer 65 - 89 %
	Cinzas volantes 11 - 35 %
	Outros constituintes 0 - 5 %

QUADRO 7 – CLASSES DE RESTÊNCIA (adaptado de [23])

CLASSES DE RESISTÊNCIA	
52,5 R	Resistência a 28 dias ≥ 52,5 MPa Resistência a 2 dias ≥ 30,0 MPa
52,5 N	Resistência a 28 dias ≥ 52,5 MPa Resistência a 2 dias ≥ 20,0 MPa
42,5 R	42,5 MPa ≤ Resistência a 28 dias ≤ 62,5 MPa Resistência a 2 dias ≥ 20,0 MPa
32,5 N	32,5 MPa ≤ Resistência a 28 dias ≤ 52,5 MPa Resistência a 7 dias ≥ 16,0 MPa

Na elaboração dos betões leves, foi utilizado como ligante, um cimento Portland do Tipo II/A-L da Classe 42,5 R.

Não foi elaborada qualquer tipo de caracterização a este material, pois o controle de qualidade deste está conforme os parâmetros preconizados pela Norma Portuguesa NP EN 197-1 [23]. As características deste ligante são fornecidas pelo fabricante, tal como podemos ver no quadro seguinte.

QUADRO 8 – PROPRIEDADES DO CIMENTO PORTLAND TIPO II/A-L 42,5 R [47]

Propriedades	Valor
Teor de sulfatos (%)	≤ 4
Teor de cloretos (%)	≤ 0,10
Início de presa (min)	≥ 60
Expansibilidade (mm)	≤ 10
Compressão - 2 dias (Mpa)	≥ 20
Compressão - 28 dias (Mpa)	≥ 42,5 e ≤ 62,5

O cimento mais utilizado nas obras de construção civil é o cimento Portland Tipo II 32,5 N devido ao baixo calor de hidratação e principalmente ao seu custo. Porém, de acordo com o fornecedor, o cimento mais indicado para betões leves de regularização é o cimento Portland Tipo II/A-L 42,5 R, sendo esta a razão pela qual se optou por este tipo de cimento [47].

4.5. AGREGADO FINO

O agregado fino utilizado neste trabalho foi uma areia rolada de origem natural, vulgarmente denominada por amarela, fornecida pelo IST. Este agregado fino foi caracterizado, tal como os agregados leves, de acordo com as respectivas normas.

4.6. AGREGADO GROSSO

O betão de referência foi produzido com um agregado grosso corrente de origem natural com máxima dimensão próxima dos agregados leves estudados. Este agregado passa a ser identificado, ao longo do trabalho, por brita 0.

FIGURA 21 – BRITA 0

É de referir que, devido ao facto de inicialmente não estar prevista a utilização deste material, não foram feitos ensaios para o caracterizar, sendo, deste modo, utilizados os dados indicados na ficha técnica fornecida pelo LNEC (ANEXO 5).

4.7. ÁGUA

A água utilizada neste trabalho foi a fornecida pela rede pública da cidade de Lisboa que abastece os laboratórios onde foi elaborada a caracterização dos materiais (IST), e as amassaduras (LNEC). Sendo a água considerada própria para consumo, as exigências normativas decorrentes da NP EN 206 - 1 [3] estão satisfeitas.

4.8. CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

A caracterização dos agregados a utilizar no fabrico de um betão é de extrema importância para que se possa conhecer as suas propriedades de modo a poder formular, da melhor forma possível, uma composição para o tipo de betão que se pretende.

Neste estudo foi apenas necessário caracterizar os materiais relativamente à sua granulometria, baridade, massa volúmica e absorção de água.

É de referir que, neste trabalho, a formulação das composições, como se poderá ver mais à frente, foi baseada em bibliografia consultada, sendo, neste caso, a caracterização dos materiais importante para elaborar alterações nas amassaduras experimentais de modo a obtermos a composição pretendida.

4.8.1. Análise granulométrica

A distribuição das partículas dos agregados segundo fracções de diferentes dimensões é designada por granulometria e tem uma enorme influência sobre as propriedades dos betões, particularmente no que se refere à compacidade (modo como as partículas se arrumam) e à trabalhabilidade (maior ou menor facilidade com que o material é amassado, transportado, colocado, compactado e acabado, sem ocorrer segregação).

A determinação da granulometria foi feita com base na Norma Portuguesa NP EN 933-1 “Análise granulométrica, método da peneiração” [24], nos agregados leves e na areia.

O processo consistiu na peneiração a seco do agregado através de uma série de peneiros de malha quadrada com aberturas normalizadas compreendidas entre 152,4 mm e 0,074 mm (série ASTM), pesagem das parcelas de agregado retidas em cada peneiro e cálculo das fracções granulométricas correspondentes.

FIGURA 22 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

De acordo com a norma acima referida, a massa a ensaiar de cada provete varia consoante a dimensão máxima do agregado e o tipo de agregado. Este processo não foi respeitado no caso em estudo, tendo sido utilizados em todos os agregados, provetes com massas de aproximadamente 1000g.

A análise granulométrica da brita 0, fornecida pelo fabricante, está feita para uma série de peneiros diferente da utilizada para caracterizar granulométricamente os agregados utilizados. Deste modo, para se poder apresentar uma curva granulométrica na mesma escala fez-se, através de uma interpolação linear, a correspondência entre a série de peneiros da brita 0 e a ASTM.

A seguir estão apresentados os valores referentes à análise granulométrica, quadros 9 e 10, bem como a sua representação gráfica, sendo que no Anexo 1 são apresentados os quadros preenchidos pormenorizadamente. Os valores referentes à brita 0 (QUADRO 11) são apresentados nas duas séries de peneiros devido ao que foi acima referido.

QUADRO 9 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DA AREIA E DA ARGEX

Data de ensaio		Material: Areia Amarela		Material: Argex 2-4	
26-Mar-09		Massa da amostra (g): 1000,2		Massa da amostra (g): 1000,3	
Peneiro	Malha [mm]	Resíduo acumulado		Resíduo acumulado	
		Passado	Retido	Passado	Retido
		[%]	[%]	[%]	[%]
6"	152,4	100,00	0,00	100,00	0,00
4"	101,6	100,00	-	100,00	-
3"	76,2	100,00	0,00	100,00	0,00
2"	50,8	100,00	-	100,00	-
1"1/2	38,1	100,00	0,00	100,00	0,00
1"	25,4	100,00	-	100,00	-
3/4"	19,1	100,00	0,00	100,00	0,00
1/2"	12,7	100,00	-	100,00	-
3/8"	9,52	100,00	0,00	100,00	0,00
1/4"	6,35	99,44	-	94,54	-
Nº4	4,76	98,97	1,03	83,16	16,84
Nº8	2,38	93,68	6,32	43,77	56,23
Nº16	1,19	67,21	32,79	9,29	90,71
Nº30	0,59	24,46	75,54	4,00	96,00
Nº50	0,297	6,03	93,97	1,57	98,43
Nº100	0,149	0,77	99,23	0,85	99,15
Nº200	0,074			-	-
Refugo	-	-	-	-	-
Totais		-	308,88	-	457,36
Módulo de Finura			3,09		4,57

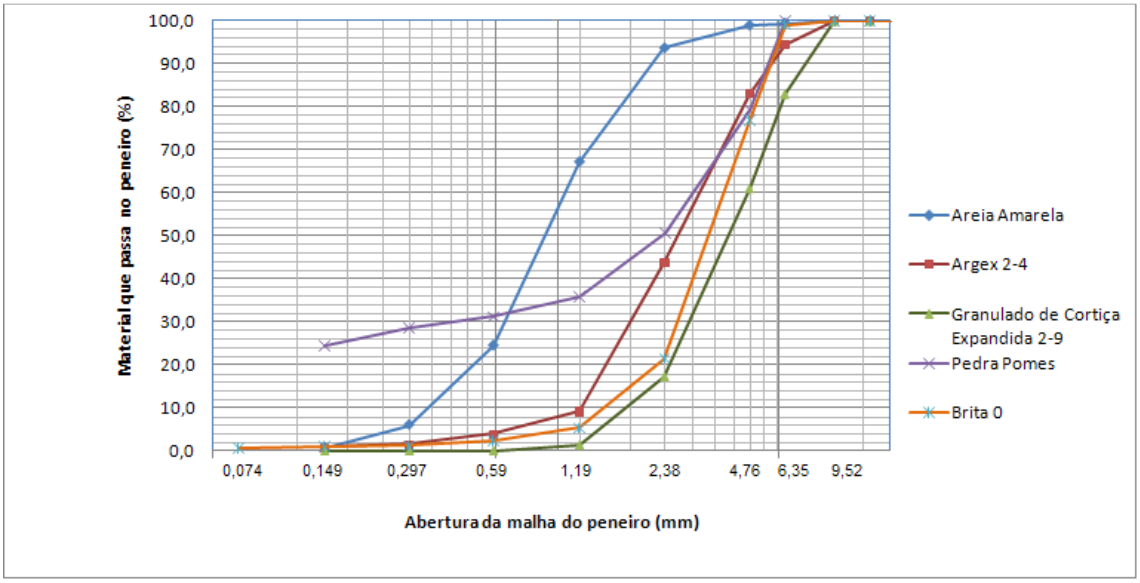
QUADRO 10 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO GRANULADO DE CORTIÇA E DA PEDRA-POMES

Data de ensaio		Material: Granulado de Cortiça		Material: Pedra-pomes	
26-Mar-09		Massa da amostra (g): 1002,4		Massa da amostra (g): 1034,3	
Peneiro	Malha [mm]	Resíduo acumulado		Resíduo acumulado	
		Passado	Retido	Passado	Retido
		[%]	[%]	[%]	[%]
6"	152,4	100,00	0,00	100,00	0,00
4"	101,6	100,00	-	100,00	-
3"	76,2	100,00	0,00	100,00	0,00
2"	50,8	100,00	-	100,00	-
1"1/2	38,1	100,00	0,00	100,00	0,00
1"	25,4	100,00	-	100,00	-
3/4"	19,1	100,00	0,00	100,00	0,00
1/2"	12,7	100,00	-	100,00	-
3/8"	9,52	100,00	0,00	100,00	0,00
1/4"	6,35	82,98	-	100,00	-
Nº4	4,76	61,03	38,97	79,17	20,83
Nº8	2,38	17,31	82,69	50,56	49,44
Nº16	1,19	1,35	98,65	35,72	64,28
Nº30	0,59	0,06	99,94	31,18	68,82
Nº50	0,297	0,00	100,00	28,61	71,39
Nº100	0,149	0,00	100,00	24,34	75,66
Nº200	0,074				
Refugo	-	-	-	-	-
Totais		-	520,24	-	350,41
Módulo de Finura			5,20		3,50

QUADRO 11 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DA BRITA 0

Peneiro (mm)	Passado acumulado (%)	Peneiro Série ASTM (mm)	Passado acumulado (%)
80	100	**152,4**	100
63	100	**101,6**	100
40	100	**76,2**	100
31,5	100	**50,8**	100
20	100	**38,1**	100
16	100	**25,4**	100
14	100	**19,1**	100
12,5	100	**12,7**	100
10	100	**9,52**	100
8	100	**6,35**	99,03
6,3	99	**4,76**	76,9
4	66	**2,38**	21,45
2	11	**1,19**	5,33
1	4	**0,59**	2,36
0,5	2	**0,297**	1,19
0,25	1	**0,149**	1
0,125	1	**0,074**	0,59
0,063	0,5	**-**	-

GRÁFICO 1 – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS



Desta análise granulométrica feita aos agregados, foi possível retirar as curvas granulométricas acima indicadas, e alguns parâmetros importantes para sua caracterização, como se indica a seguir.

- *Máxima dimensão "D"* [25]– menor abertura da malha do peneiro onde passa uma quantidade de agregado igual ou superior a 90%;
- *Mínima dimensão "d"* [25]– abertura da malha do peneiro que passa uma quantidade de agregado igual ou inferior a 5%;

- *Módulo de finura* – indica a dimensão média ponderada do grupo na qual é retido a maior quantidade do material;
- *% de finos* – percentagem de material que passa no peneiro 200 (0,075 mm).

QUADRO 12 – PARÂMETROS CARACTERIZADORES DOS AGREGADOS

Material	D	d	Módulo de finura	Finos
	(mm)	(mm)		%
Areia amarela	2,38	0,149	3,1	0,8
Argex 2-4	6,35	0,59	4,6	0,9
Granulado de cortiça expandida 2-9	9,52	1,19	5,2	0
Pedra-pomes	6,35	0,074	3,5	24,3
Brita 0	6,35	0,59	5,1	0,6

Devido ao facto da série de peneiros utilizada não ter o peneiro de malha 0,074 mm, pois estava danificado, a percentagem de finos foi determinada com a percentagem de material que passa no peneiro de malha 0,149 mm.

É possível verificar, através do QUADRO 12, que a % de finos da pedra-pomes é muito superior à dos restantes agregados. Este facto deveu-se à granulometria inicial da pedra-pomes ser muito elevada, tendo-se moído esse agregado de modo a obter um material com um diâmetro máximo de 6,35 mm. Esse procedimento fez com que se obtivesse um material com uma % de finos muito elevada em comparação com os outros agregados.

4.8.2. Baridade

A baridade dos agregados, também denominada como densidade aparente, define-se como sendo a relação entre a massa de uma quantidade de agregados e o volume ocupado pelos mesmos incluindo vazios. A sua determinação é feita de acordo com o método descrito na norma NP 955, "Agregados para argamassas e betões. Determinação da baridade" [29].

O processo consiste na determinação da massa do agregado seco que preenche, em duas condições de compactação, um recipiente de capacidade conhecida. A obtenção da baridade permite converter massas em volumes do material solto.

Segundo a EN 13055-1 2002 [25], a baridade dos agregados leves deve ser determinada de acordo com o estabelecido pela NP EN 1097-3 2000 [26]. Porém, os procedimentos genéricos estabelecidos na NP EN 1097-3 2000 respeitam os mesmos princípios presentes na NP 955, pelo que, no que se refere à determinação da baridade de agregados leves, adoptam-se os procedimentos estabelecidos na NP 955.

FIGURA 23 – EQUIPAMENTO PARA DETERMINAR A BARIDADE

No quadro seguinte, está indicada a baridade de cada um dos agregados utilizados, sendo que no Anexo 2 são apresentas as fichas preenchidas aquando da realização dos ensaios.

QUADRO 13 – BARIDADE DOS AGREGADOS

Agregado	Baridade [kg/m^3]	
	Compactado	Não Compactado
Areia amarela	1650	1550
Argex 2-4	490	470
Granulado de cortiça expandida 2-9	90	80
Pedra-pomes	630	600

4.8.3. Massa volúmica

De acordo com a norma NP EN 1097-6 2003 – Parte 6 "Determinação da massa volúmica e da absorção de água" [27], a massa volúmica de partículas secas é a relação entre a massa de uma amostra de agregado seca em estufa e o volume que esta amostra ocupa dentro de água incluindo quaisquer poros internos e os poros acessíveis à água.

A partir do conhecimento da massa volúmica dos agregados é possível dosear as quantidades de cada agregado necessárias para uma unidade de volume de betão.

Em função do tipo de agregado que se pretende caracterizar, a norma, acima referida, define diferentes processos para determinar a massa volúmica. Deste modo, para o agregado fino, aplica-se o "*Método do picnómetro para partículas de agregados entre 0,063 mm e 4 mm*", com o objectivo de determinar a massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca que é definida como, "*Relação entre a massa da amostra do agregado incluindo a massa da água alojada nos poros acessíveis à água e o volume que a amostra ocupa na água incluindo quer os poros acessíveis à água, quer os poros internos fechados*". Na FIGURA 24 é possível verificar alguns passos do processo utilizado para determinar a massa volúmica da areia.

FIGURA 24 – DETERMINAÇÃO DA MASSA VOLÚMICA DA AREIA

Para a caracterização da massa volúmica dos agregados leves, é aplicável o normativo do Anexo C "*Determinação da massa volúmica das partículas e da absorção de água de agregados leves*" da norma NP EN 1097-6 2003. De acordo com este Anexo, a massa volúmica dos agregados leves é descrita como sendo "*A relação entre a massa de uma amostra de agregado seco na estufa e o volume que esta amostra ocupa dentro de água incluindo quaisquer poros internos fechados mas excluindo poros acessíveis à água*". Na figura seguinte estão as amostras de argex, areia e cortiça nos respectivos picnómetros.

FIGURA 25 – PICNÓMETROS COM AS AMOSTRAS DE ARGEX, AREIA E CORTIÇA, RESPECTIVAMENTE

No QUADRO 14 são apresentados os valores das massas volúmicas dos agregados saturados com superfície seca. No Anexo 3 são apresentadas as fichas completas dos ensaios realizados para a determinação das massas volúmicas.

QUADRO 14 – MASSA VOLÚMICA DOS AGREGADOS (Resultados após 24 horas)

Agregado	Massa volúmica [kg/m^3] Partículas saturadas com superfície seca
Areia amarela	2590
Argex 2-4	700
Granulado de cortiça expandida 2-9	150
Pedra-pomes	790

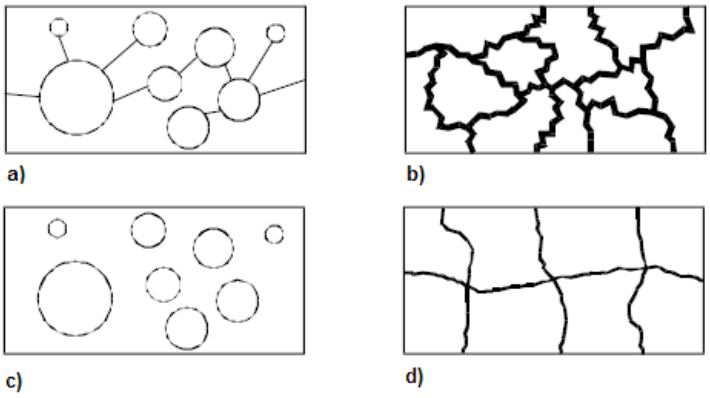
4.8.4. Absorção de água

A absorção de água, que representa a relação entre a massa de água absorvida e a massa das partículas no estado anidro, é uma das características mais importantes nos agregados leves, pela influência que tem no desempenho do betão tanto no estado fresco como no estado endurecido [10] [30].

A totalidade de água absorvida, assim como a sua evolução ao longo do tempo, dependem do valor da porosidade, da distribuição e ligação entre os poros, das características da superfície e da água já contida [10]. A quantidade, conectividade e a dimensão dos poros influenciam a velocidade de absorção de água pelo material [30].

A porosidade dos agregados é, geralmente, associada à sua permeabilidade, mas na prática essa relação não se afigura tão linear, pois o tipo de conexão entre os poros é que determina a relação entre a porosidade e a permeabilidade [14]. Um material pode ser poroso, mas se não existir ligação entre os seus poros este não é permeável.

FIGURA 26 – POROSIDADE VERSUS PERMEABILIDADE: a) Alta porosidade / baixa permeabilidade; b) poroso / alta permeabilidade; c) poroso / não permeável; d) baixa porosidade / alta permeabilidade



Devido à importância que a absorção de água tem no desempenho dos betões, foram realizados os ensaios para determinar esta característica nos agregados utilizados. Este processo foi feito de acordo com a norma NP EN 1097-6 2003 – Parte 6 “Determinação da

massa volúmica e da absorção de água" [27], sendo que, tal como na determinação da massa volúmica, para os agregados leves utilizou-se o normativo do Anexo C, "*Determinação da massa volúmica das partículas e da absorção de água de agregados leves*". De modo a avaliar a evolução da quantidade de água absorvida ao longo do tempo, efectuaram-se medições desta propriedade ao fim dos seguintes períodos de tempo: 5 minutos, 2 horas e 24 horas.

No caso da areia, foi utilizado o "*Método do picnómetro para partículas de agregados entre 0,063 mm e 4 mm*", onde através do procedimento feito para a determinação da massa volúmica foi determinada a absorção de água pela fórmula referida na respectiva norma (FIGURA 27) [27].

FIGURA 27 – DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA DA AREIA

No QUADRO 15 são apresentados os valores da absorção de água dos agregados após 24 horas. No Anexo 3 são apresentados as fichas completas dos ensaios realizados para a determinação da absorção de água.

QUADRO 15 – ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS AGREGADOS APÓS 24 HORAS

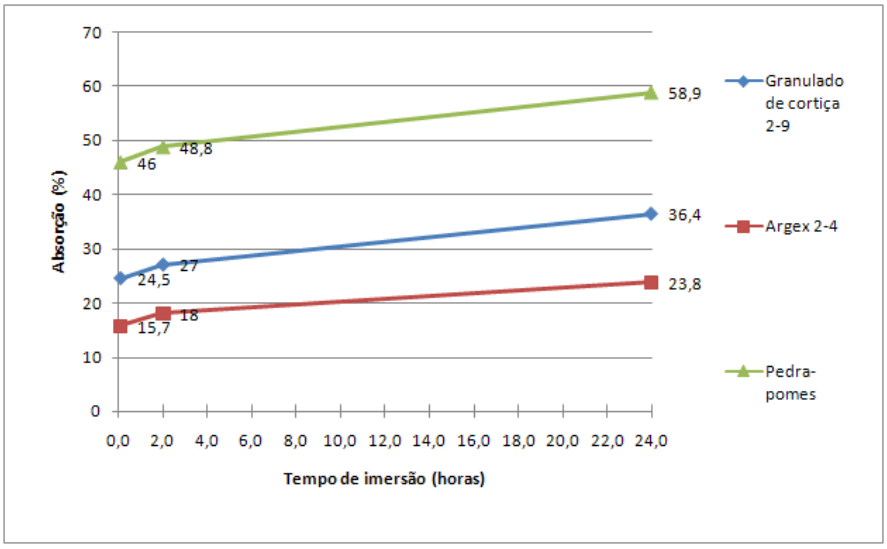
Agregado	Absorção de água [%]
Areia amarela	1,2
Argex 2-4	23,8
Granulado de cortiça expandida 2-9	36,4
Pedra-pomes	58,9

Segundo a norma utilizada, é comum determinar também a absorção de água após um intervalo de 7 dias, pois os agregados continuam a absorver água para além das 24 horas. Contudo, o período mais crítico é nas primeiras 24 horas, pois é neste intervalo de tempo que o betão fresco tem maior quantidade de água, em que parte dela é responsável pelas reacções

de hidratação do cimento e a outra parte é absorvida pelos agregados. Por essa razão foram apenas determinadas as absorções dos agregados até às 24h.

No gráfico seguinte estão representadas as absorções de água dos agregados leves ao longo do tempo. Deste modo, é visível a evolução, em termos de absorção, de cada material, podendo, assim, analisar-se a nível temporal os períodos mais críticos.

GRÁFICO 2 – EVOLUÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS AGREGADOS AO LONGO DO TEMPO



Através de uma análise gráfica pode-se observar que, em ambos agregados leves utilizados, o período a que corresponde a uma absorção mais rápida de água é entre os 5 minutos e as 2 horas, sendo que, após esse período a velocidade a inclinação das curvas é menor significando uma velocidade de absorção mais baixa.

O conhecimento da percentagem de água que cada agregado absorve permite a que se possa utilizar os agregados no estado seco. Para tal, é necessário acrescentar à água de amassadura a quantidade de água que os materiais absorvem num determinado período de tempo, normalmente às 24 horas.

5. FORMULAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES ESTUDADAS

No que diz respeito à parte experimental deste trabalho, produziram-se vários betões com diferentes tipos de agregados leves para se poder avaliar a influência que o agregado tem no tempo de secagem de cada betão. Para tal, utilizou-se como ligante um cimento Portland CEM II/A-L 42,5R. Os agregados utilizados foram a areia amarela, a brita 0, o granulado de cortiça expandida, a argila expandida e a pedra-pomes.

Os betões serão designados pelas seguintes siglas:

BR – betão de referência;

BLGC – betão leve de granulado de cortiça;

BLAE – betão leve de argila expandida;

BLPP – betão leve de pedra-pomes.

5.1. AMASSADURAS PRELIMINARES

As composições adoptadas para a produção dos betões referidos tiveram como base as referidas no QUADRO 16 (adaptado de [43]). Contudo, nesta fase de amassaduras preliminares, foram feitas várias alterações de modo a obter o tipo de betão pretendido.

De forma a se poder avaliar a influência do agregado leve na secagem de cada tipo de betão, fixou-se, em todas as composições, a quantidade de cimento, areia e água efectiva. A quantidade de agregado leve foi ajustada de maneira a se manter a relação volumétrica entre todos os betões produzidos.

QUADRO 16 – COMPOSIÇÕES INICIAIS DOS BETÕES (relação A/C = 0,4)

	Água efectiva (l/m^3)	Cimento (kg/m^3)	Agregados (kg/m^3)	
			Areia	Agregado Leve
BR	145,0	350,0	1885,0	-
BLGC	145,0	350,0	610,0	59,8
BLAE	145,0	350,0	610,0	348,7
BLPP	145,0	350,0	610,0	224,1

Como se usaram os agregados no estado seco, acrescentou-se a quantidade de água que cada agregado tem a capacidade de absorver às 2 horas. No caso da areia, a absorção de água utilizada foi às 24 horas, pois para este tipo de agregados, este é o valor utilizado.

QUADRO 17 – ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS AGREGADOS ÀS 2H

Agregado	Absorção de água [%]
Areia amarela (24h)	1,2
Argex 2-4	18
Granulado de cortiça expandida 2-9	27
Pedra-pomes	48,8

Considerando a absorção dos agregados acima indicada, as composições para as primeiras amassaduras foram as seguintes

QUADRO 18 – COMPOSIÇÕES UTILIZADAS NAS PRIMEIRAS AMASSADURAS (A/C = 0,4)

	Água total (l/m^3)	Cimento (kg/m^3)	Agregados (kg/m^3)	
			Areia	Agregado Leve
BR	167,6	350,0	1885,0	-
BLGC	168,5	350,0	610,0	59,8
BLAE	215,1	350,0	610,0	348,7
BLPP	261,7	350,0	610,0	224,1

Desta forma, foi produzido 1 litro de cada betão de modo a ver a sua consistência e avaliar a sua massa volúmica. Contudo, a consistência obtida no betão de referência conduziu a uma mistura muito seca e desagregada (FIGURA 29). Produziu-se apenas 1 litro de cada betão, tendo-se utilizado uma misturadora pequena como se pode visualizar na FIGURA 28.

FIGURA 28 – PRIMEIRA AMASSADURA PRELIMINAR (BR)

FIGURA 29 – ESPALHAMENTO DA ARGAMASSA PRODUZIDA

Devido ao betão produzido apresentar uma consistência muito seca para o fim a que se destina, procedeu-se a nova correcção das composições, alterando a relação A/C de 0,4 para 0,6.

QUADRO 19 – COMPOSIÇÕES UTILIZADAS NAS SEGUNDAS AMASSADURAS (A/C = 0,6)

	Água total (l/m^3)	Cimento (kg/m^3)	Agregados (kg/m^3)	
			Areia	Agregado Leve
BR	230,6	350,0	1718,7	-
BLGC	231,4	350,0	610,0	52,0
BLAE	271,9	350,0	610,0	303,2
BLPP	312,4	350,0	610,0	194,9

Com as alterações feitas relativamente à quantidade de água de amassadura, o betão de referência obtido, apresentou-se ainda um pouco seco mas com alguma coesão, tendo sido considerado como aceitável para a elaboração de camadas de forma.

FIGURA 30 – AMASSADURAS EXPERIMENTAIS

Finalmente, foram feitas as correcções às quantidades de agregado leve de cada betão, de maneira a que a produção de 1 litro de betão correspondesse ao volume total de 1 litro. Para tal, foi utilizado um recipiente com um volume de 1 litro onde foi colocado todo o material produzido.

FIGURA 31 – COLOCAÇÃO DA TOTALIDADE DE BETÃO PRODUZIDO NO RECIPIENTE DE 1L

Em alguns dos betões (BLGC e BLPP) verificou-se, após a vibração, que o material produzido não era suficiente para ocupar todo o volume do recipiente, tendo o volume em falta sido ocupado por água. Medida esta diferença de volume, foi feita a correcção das composições acrescentando estas quantidades de volume em falta por agregado leve.

FIGURA 32 – VIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO DA QUANTIDADE DE MATERIAL EM FALTA

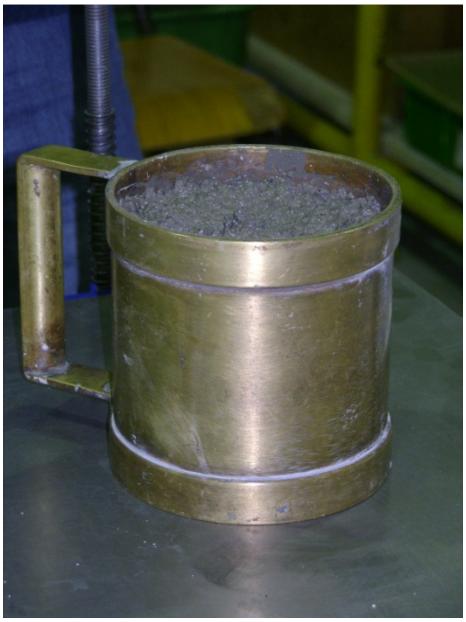


FIGURA 33 – COLOCAÇÃO DE ÁGUA PARA DETERMINAR A QUNATIDADE DE VOLUME EM FALTA

A quantidade de material em falta em dois dos betões, deveu-se a uma errada caracterização dos agregados leves no que respeita à massa volúmica. A determinação da massa volúmica de agregados leves é um processo muito minucioso, induzindo, por vezes, a valores errados.

Desta forma, foram determinadas, a partir das massas volúmicas dos betões no estado fresco (QUADRO 22), novas massas volúmicas dos agregados para se efectuar as correcções necessárias e formular as composições finais.

As massas volúmicas corrigidas dos agregados utilizadas nas composições finais são apresentadas no quadro seguinte.

QUADRO 20 – MASSA VOLÚMICA DOS AGREGADOS UTILIZADA NAS COMPOSIÇÕES FINAIS

Agregados	Massa volúmica (kg/m^3)
Areia amarela	2560
Argex 2-4	700
Granulado de cortiça 2-9	184
Pedra-pomes	827

QUADRO 21 – COMPOSIÇÕES FINAIS

	Água total (l/m^3)	Cimento (kg/m^3)	Agregados (kg/m^3)	
			Areia	Agregado Leve
BR	230,6	350,0	1718,7	-
BLGC	238,9	350,0	610,0	79,9
BLAE	271,9	350,0	610,0	303,2
BLPP	392,2	350,0	610,0	358,3

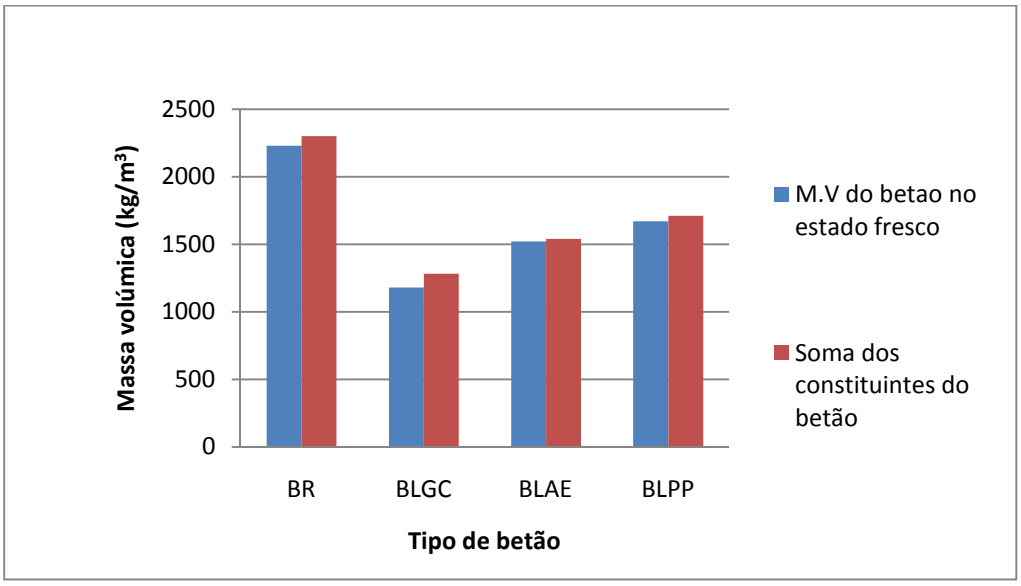
De acordo com a norma NP 1384 “Betões. Determinação da massa volúmica do betão fresco” [34] foram determinadas as massas volúmicas dos betões no estado fresco enchendo-se um recipiente com volume e massa conhecidos e pesando-se. Os valores das massas volúmicas dos betões produzidos são apresentados a seguir num quadro resumo, sendo que em anexo são apresentados todos os dados referentes a este ensaio.

QUADRO 22 – MASSA VOLÚMICA DOS BETÕES NO ESTADO FRESCO

	Massa volúmica do betão fresco (kg/m^3)
BR	2230
BLGC	1180
BLAE	1520
BLPP	1670

A massa volúmica de um betão no estado fresco deve corresponder à soma de todos os materiais que integram a sua composição. Contudo, é possível verificar que os valores indicados no QUADRO 22 têm algumas diferenças em relação à soma das composições finais de cada betão indicadas no QUADRO 21. Tal facto deve-se ao teor de ar contido no betão após o processo de amassadura que não foi considerado no cálculo da composição. No gráfico seguinte, é possível verificar essas diferenças.

GRÁFICO 3 – COMPARAÇÃO DAS MASSAS VOLÚMICAS DOS BETÕES



Como era de prever, o betão com massa volúmica mais elevada é o betão de referência (BR) devido à sua composição não conter agregados leves. Como a cortiça é o agregado com a menor baridade, o betão com granulado de cortiça (BLGC) apresenta a menor massa volúmica.

5.2. AMASSADURAS FINAIS E CONFECÇÃO DE PROVETES

Como já foi anteriormente referido, para que se pudesse avaliar a influência do tipo do agregado na secagem dos betões foi necessário acrescentar, ao betão de referência, um agregado com granulometria semelhante ao agregado leve presente nos outros betões produzidos. Para tal foi introduzido uma brita 0 na composição do betão de referência. Desta forma, fixou-se, tal como nos outros betões, a quantidade de areia e determinou-se a quantidade de brita 0 a colocar de modo a manter as relações volumétricas entre todos os betões produzidos. No quadro a seguir são apresentadas as composições utilizadas para a formulação dos betões.

QUADRO 23 – COMPOSIÇÕES APLICADAS NA PRODUÇÃO DOS BETÕES A ESTUDAR

	Água total (l/m^3)	Cimento (kg/m^3)	Agregados (kg/m^3)		
			Areia	Agregado Leve	Brita 0
BR	230,6	350,0	610,0	-	1108,7
BLGC	238,9	350,0	610,0	79,9	-
BLAE	271,9	350,0	610,0	303,2	-
BLPP	392,2	350,0	610,0	358,3	-

Para o estudo em causa, era apenas necessário a produção de 5 litros de cada betão. No entanto, devido a esta parte do trabalho ter sido feita em conjunto com outro trabalho de investigação para uma tese de mestrado [48], produziram-se 35 litros de cada betão.

5.2.1. Equipamento

As amassaduras foram executadas numa betoneira de eixo vertical com capacidade para 35 l, como se pode ver na figura seguinte. Este foi o equipamento escolhido devido ao volume de betão que se produziu em cada amassadura.

FIGURA 34 – BETONEIRA ONDE SE EFECTUARAM AS AMASSADURAS

A consistência de cada betão foi avaliada através do ensaio de espalhamento utilizando o cone do ensaio descrito pela norma NP EN 12350-5:2009 – “Ensaios do betão fresco. Parte 5: Ensaio de espalhamento” [35]

FIGURA 35 – CONE DE ABRAMS

A compactação do betão foi efectuada recorrendo a uma mesa vibratória com frequência ajustável, como se pode ver na FIGURA 36.

FIGURA 36 – MESA VIBRATÓRIA

5.2.2. Procedimentos

Os procedimentos de amassadura adoptados foram iguais em todas as amassaduras realizadas.

- Colocar os diferentes tipos de agregados com o cimento na betoneira e misturar durante 1 minuto;
- Juntar a totalidade da água e deixar misturar durante 5 minutos.

5.2.3. Consistência do betão

Após o processo de amassadura foi determinada a consistência de cada betão segundo o ensaio de espalhamento. Os valores referentes aos abaixamentos estão indicados no quadro seguinte para cada um dos betões produzidos.

QUADRO 24 – ABAIXAMENTO DOS BETÕES SEGUNDO O CONE DE ABRAMS

	Abaixamento após 25 pancadas (mm)
BR	155
BLGC	inválido
BLAE	175
BLPP	180*

* Neste betão foram aplicadas apenas 15 pancadas pois o espalhamento atingiu os limites da base.

No betão leve de granulado de cortiça o ensaio de abaixamento foi inválido, pois o espalhamento do betão após as vinte e cinco pancadas ultrapassou os limites da mesa de apoio devido à sua fluidez.

5.2.4. Confecção e conservação dos provetes

Tendo em conta as dimensões dos materiais utilizados e os ensaios a realizar, foram utilizados moldes cúbicos com dimensões 10x10x10 cm^3, para todos os betões.

O enchimento dos moldes foi executado em camada única. Os tempos de vibração, bem como a frequência empregada, dependem dos tipos de betões que se pretende vibrar. No quadro seguinte são apresentados os tempos e frequências de vibração aplicadas a cada betão.

QUADRO 25 – TEMPOS E FREQUÊNCIAS DE VIBRAÇÃO DOS DIFERENTES BETÕES

	Frequência de vibração	Tempo de vibração
BR	40 Hz	50 s
BLGC	apiloado manualmente	-
BLAE	40 Hz	50 s
BLPP	40 Hz	50 s

FIGURA 37 – VIBRAÇÃO DOS PROVETES

Devido ao facto da cortiça absorver a energia proveniente da vibração, os provetes de betão com granulado de cortiça foram apiloados manualmente, como se pode ver na figura seguinte, em vez de vibrados. Este procedimento foi feito, em cada provete, em duas camadas, de modo a se obter uma melhor compactação do betão.

FIGURA 38 – APILOAMENTO DOS PROVETES DE BLGC

Depois de moldados, os provetes foram mantidos nos moldes cerca de 24 horas, no ambiente da sala de ensaios, protegidos contra a perda de humidade, sendo desmoldados após esse tempo.

FIGURA 39 – PROVETES APÓS A MOLDAGEM

Para que os provetes fossem submetidos a um processo de secagem unidireccional, esses tiveram de ser impermeabilizados em cinco das suas seis faces, ficando a face de enchimento exposta ao ambiente. Para tal, pintou-se os provetes, com *Icosit K 101*, um ligante com base em resinas de epoxi que serve de revestimento de protecção para contacto com água potável. Foram aplicadas duas demãos para que as faces dos provetes ficassem devidamente impermeabilizadas.

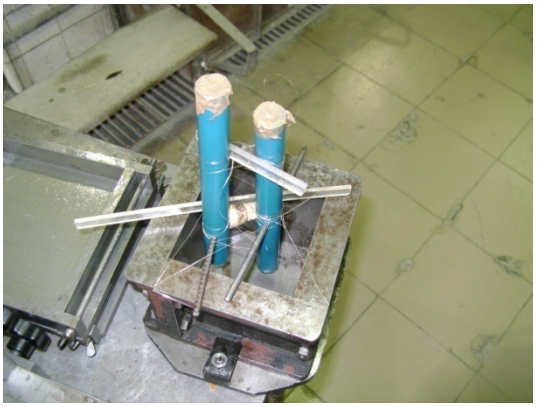
FIGURA 40 – PINTURA DOS PROVETES

Após a pintura, os provetes foram mantidos na mesma sala cerca de 24 horas até a pintura estar seca, sendo posteriormente identificados e levados para uma sala de ambiente controlado onde foram colocados em condições apropriadas para os ensaios a realizar.

Para este trabalho foram confeccionados quatro provetes de cada tipo de betão, o que perfaz um total de dezasseis provetes.

Contudo foram confeccionados dois provetes a mais de betão com argila expandida para aplicação de um método, indicado mais à frente, para determinação da humidade relativa interior do betão. Num destes provetes a mais a moldagem foi feita com dois tubos no interior do molde de modo a criar dois orifícios, como se pode ver na figura seguinte, numa face do cubo de betão.

FIGURA 41 – MOLDAGEM DO PROVETE COM ORIFICIOS



No outro provete, confeccionado a mais, os furos foram feitos após a desmoldagem, como se pode ver na figura seguinte. Em ambos os provetes foi feita a impermeabilização das suas faces do mesmo modo como foi acima explicado para os restantes provetes.

FIGURA 42 – PROVETE COM FUROS FEITOS APÓS A DESMOLDAGEM

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo serão referidos os ensaios realizados para determinar o teor de água e a humidade relativa interior dos betões formulados, sendo analisados os valores resultantes.

Os ensaios realizados aos betões não se basearam numa norma em concreto, mas sim num conjunto de informações que permitiu escolher métodos para determinar a quantidade de água que o betão perde ao longo do tempo, o seu teor de água e a sua humidade relativa.

Inicialmente, não foi estabelecido, para nenhum dos ensaios realizados, um período de tempo para monitorização dos provetes, tendo este período terminado quando se considerou estabilizada a velocidade de secagem. As leituras dos valores referentes à perda de massa, teor de água e humidade relativa foram feitas de dois em dois dias à excepção dos fins-de-semana, ou seja, foram feitas três leituras por semana.

Após a desmoldagem dos provetes, estes foram submetidos a dois ambientes distintos, ou seja, metade dos provetes (dois de cada tipo de betão) ficaram numa sala de ensaios com ambiente controlado (temperatura: 29ºC ± 2ºC; humidade relativa ambiente: 60%), e a outra metade foi colocada numa câmara de ventilação com temperatura controlada (29ºC), de modo a se poder obter algumas conclusões acerca de procedimentos que possam acelerar o tempo de secagem dos betões. Os dois provetes de BLAE confeccionados para determinar a humidade relativa interior do betão, foram apenas submetidos ao ambiente da sala de ensaios.

Tal como foi referido no capítulo anterior, a água total de cada composição era composta parte por água efectiva (igual e todas as composições) e outra parte pela água referente às absorções (às 2 horas) de cada agregado. Devido ao facto de se ter retirado, aquando da formulação do BLPP, a fracção da pedra-pomes relativa aos 0,149 mm, a água total considerada na composição final não está de acordo com a absorção de água deste agregado, pois essa absorção foi determinada com todas as fracções da pedra-pomes.

Desta forma, todos os resultados referentes ao BLPP estarão influenciados pelo erro acima referido, impossibilitando, assim, comparações com os restantes betões.

Ao longo de todo este capítulo serão feitas referências ao teor de água, % de água e teor de humidade do betão. Todos estes termos são sinónimos, ou seja, representam a quantidade de água presente nos poros do betão (volume de água em relação ao volume total dos poros do betão.

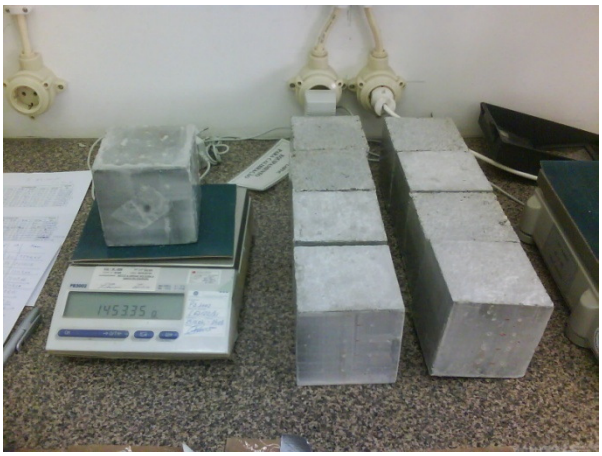
No Anexo 4 são apresentados todos os resultados, referentes aos ensaios realizados a todos os provetes de betão, que deram origem aos gráficos apresentados neste capítulo.

6.1. PERDA DE ÁGUA NOS BETÕES

Para determinar a perda de água dos betões ao longo do tempo, foram efectuadas 14 pesagens (FIGURA 43), durante um mês, a todos os provetes de betão com excepção aos dois provetes de BLAE com orifícios. Os valores indicados nos gráficos seguintes são referentes à média dos resultados entre dois betões do mesmo tipo. A redução de massa ao longo do tempo corresponde à quantidade de água que é evaporada pela única face não impermeabilizada.

É importante referir, que o instante t_0, ou seja, o instante em que foi feita a primeira pesagem, foi 24 horas após a desmoldagem dos provetes devido ao tempo necessário para a secagem da tinta impermeabilizante.

FIGURA 43 – PESAGEM DOS PROVETES

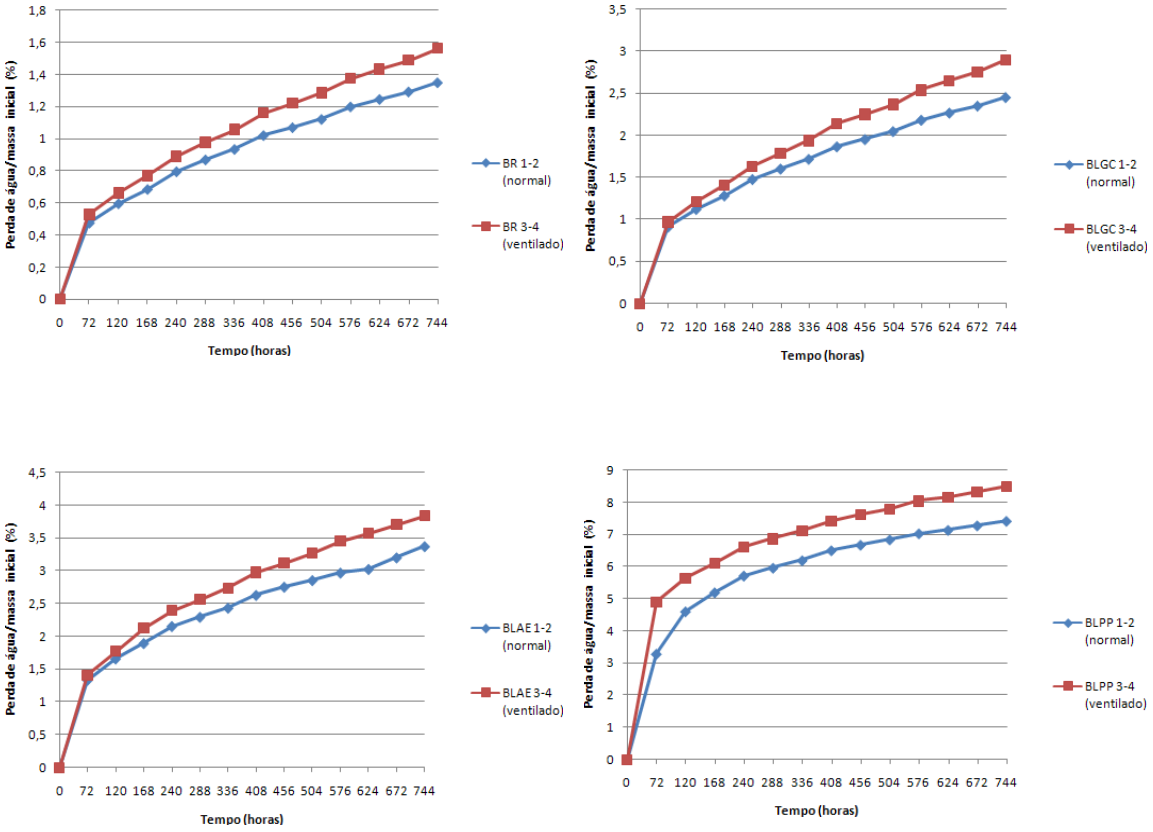


Na FIGURA 44 são apresentados os gráficos relativos à perda de água do betão por massa inicial de cada provete.

É possível verificar, através dos gráficos da FIGURA 44 que a ventilação acelera a perda de água dos betões, podendo esta influenciar mais ou menos consoante o tipo de agregado leve utilizado.

A elevada perda água do BLPP ao longo do tempo, poderá dever-se às diferentes características do agregado leve, principalmente no que diz respeito à absorção de água. A absorção da pedra-pomes determinada, de maneira incorrecta, (QUADRO 17) conduziu a que a composição do BLPP tivesse uma maior quantidade de água (QUADRO 23) em relação aos restantes betões. Desta forma, é natural que a evaporação neste betão seja superior aos restantes, pois o agregado, devido ao erro já mencionado, não absorve toda a água que deveria absorver, ficando esta livre e disponível para a evaporação.

FIGURA 44 – EVOLUÇÃO DA PERDA DE ÁGUA AO LONGO DO TEMPO


Perda de água/massa inicial (%)
Tempo (horas)
0 72 120 168 240 288 336 408 456 504 576 624 672 744
BR 1-2 (normal)
BR 3-4 (ventilado)
BLGC 1-2 (normal)
BLGC 3-4 (ventilado)
BLAE 1-2 (normal)
BLAE 3-4 (ventilado)
BLPP 1-2 (normal)
BLPP 3-4 (ventilado)

Através dos gráficos 4 e 5 é possível verificar as diferenças entre os betões em relação à perda de água. O BLPP apresenta os maiores valores devido ao que foi acima referido. As diferenças entre o BLAE e o BLGC devem-se às propriedades de cada agregado leve. Como a água que o agregado absorve fornece o sistema, o betão que tiver mais água será alvo de uma maior evaporação apresentando uma maior perda de água.

O BR apresenta os menores valores devido a ter, na sua composição, uma menor quantidade de água em relação aos restantes betões.

É possível verificar, através dos gráficos da FIGURA 44 que a ventilação acelera a perda de água dos betões, podendo esta influenciar mais ou menos consoante o tipo de agregado leve utilizado.

GRÁFICO 4 – COMPARAÇÃO DA PERDA DE MASSA ENTRE OS BETÕES (ambiente normal)

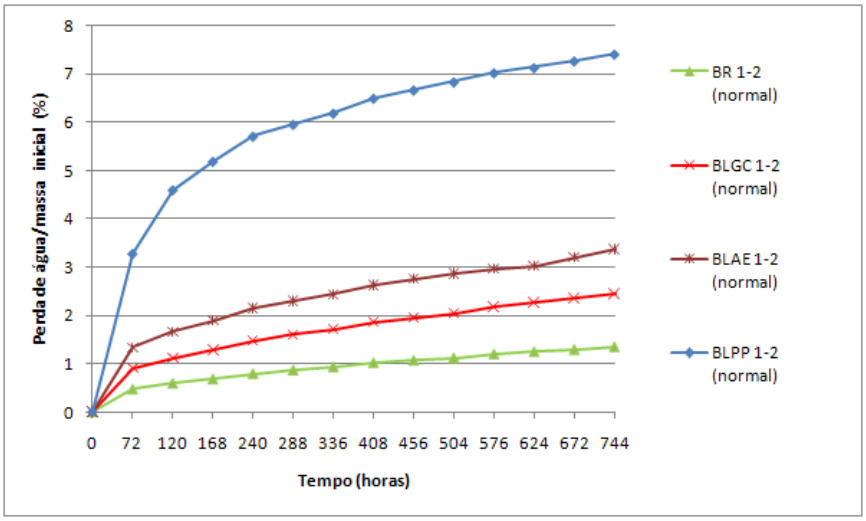
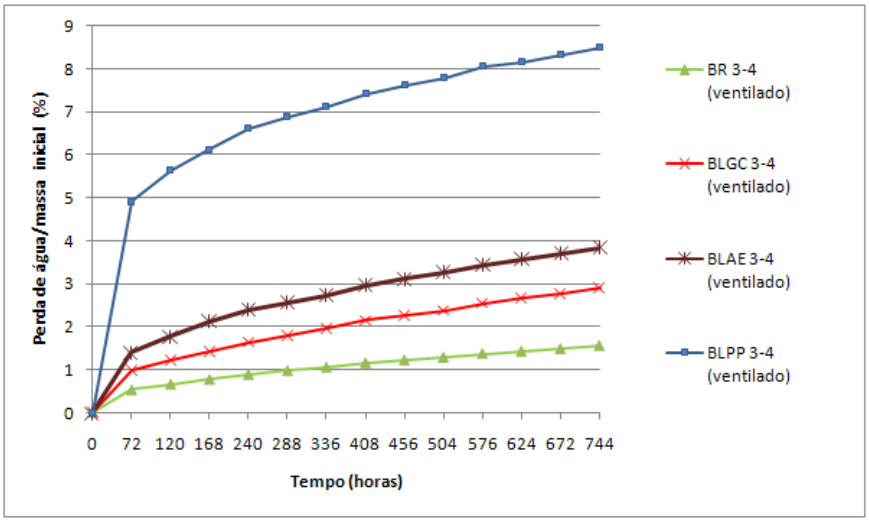


GRÁFICO 5 – COMPARAÇÃO DA PERDA DE MASSA ENTRE OS BETÕES (ambiente ventilado)

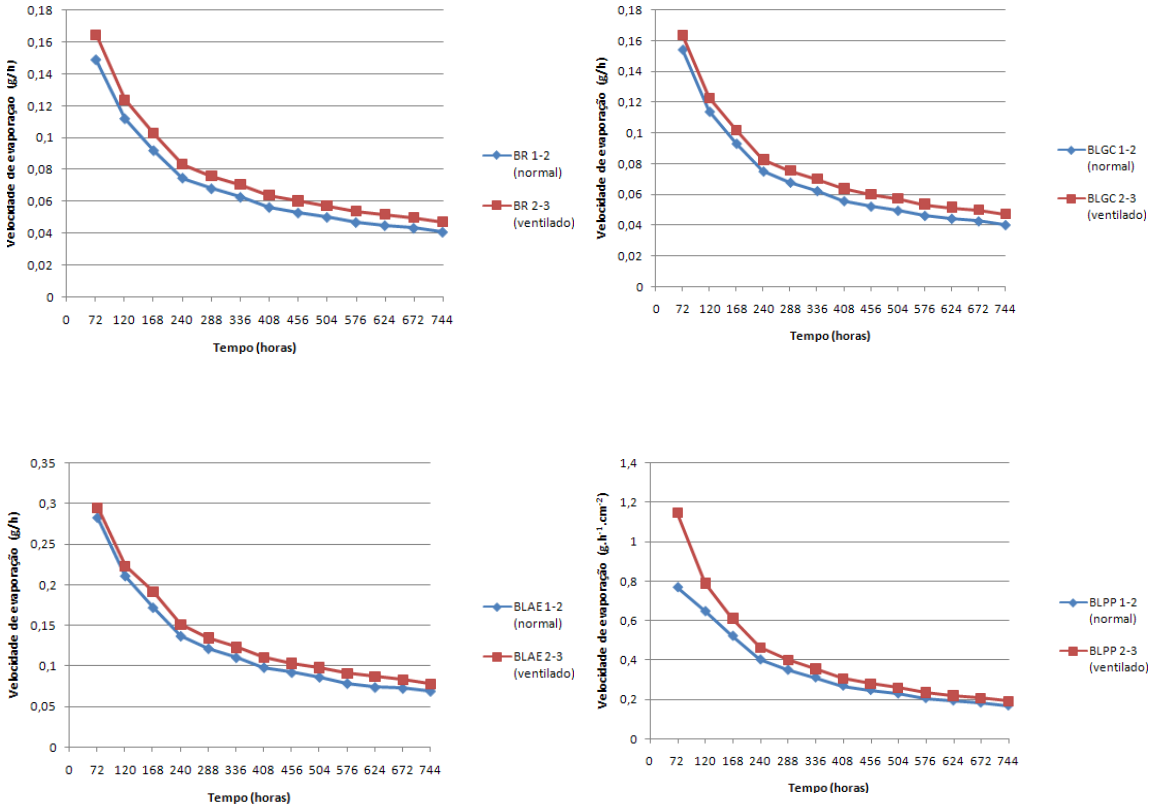


6.2. VELOCIDADE DE EVAPORAÇÃO

A partir dos valores das perdas de massa apurados, determinou-se a velocidade de evaporação, expressa em gramas de água perdidos por hora, evidenciada pelos diferentes betões. Na FIGURA 45 estão ilustrados os gráficos referentes à velocidade de evaporação de água dos vários betões.

Como seria expectável, verifica-se através da FIGURA 45, que as velocidades de evaporação são mais elevadas nas primeiras horas e que os betões submetidos ao ambiente ventilado têm maior velocidade de evaporação do que os restantes. Estes resultados devem-se ao facto de, tal como já foi referido, a velocidade de evaporação ser função da perda de massa.

FIGURA 45 – VELOCIDADE DE EVAPORAÇÃO



A avaliação do tempo de secagem é frequentemente quantificada através de um parâmetro denominado por taxa ou velocidade de evaporação *("evaporation rate")*. Este parâmetro representa a velocidade de perda de massa por unidade de área, sendo expresso por gramas por hora por centímetro-quadrado ($g.h^{-1}.cm^{-2}$), e pode ser determinado dividindo a velocidade de secagem apresentada no ANEXO 4 pela área da superfície não selada dos provetes. Todos os provetes possuíam uma selagem impermeável em 5 das suas 6 faces, com uma superfície sujeita a evaporação de dimensões idênticas (100 cm^2). Os resultados obtidos permitem verificar que a velocidade de secagem atinge o seu máximo no inicio do processo de secagem, diminuindo ao longo do tempo. Esta maior velocidade de secagem inicial estará relacionada com a maior perda de massa que se verifica nas primeiras horas.

Como se pode ver nos gráficos seguintes, o BLPP, em ambos os ambientes, apresenta a maior velocidade de evaporação, cerca de 0,78 g/h o que corresponde a uma taxa de evaporação de 0,0078 $g.h^{-1}.cm^{-2}$. As razões que poderão explicar as diferenças entre os diferentes betões são as apresentadas no ponto anterior sobre a perda de massa dos betões.

GRÁFICO 6 – COMPARAÇÃO DA VELOCIDADE DE EVAPORAÇÃO ENTRE OS BETÕES (ambiente normal)

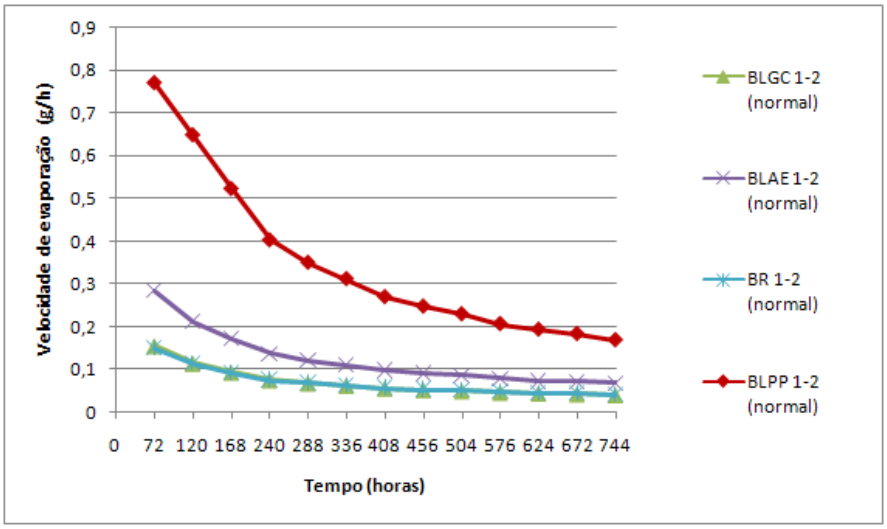
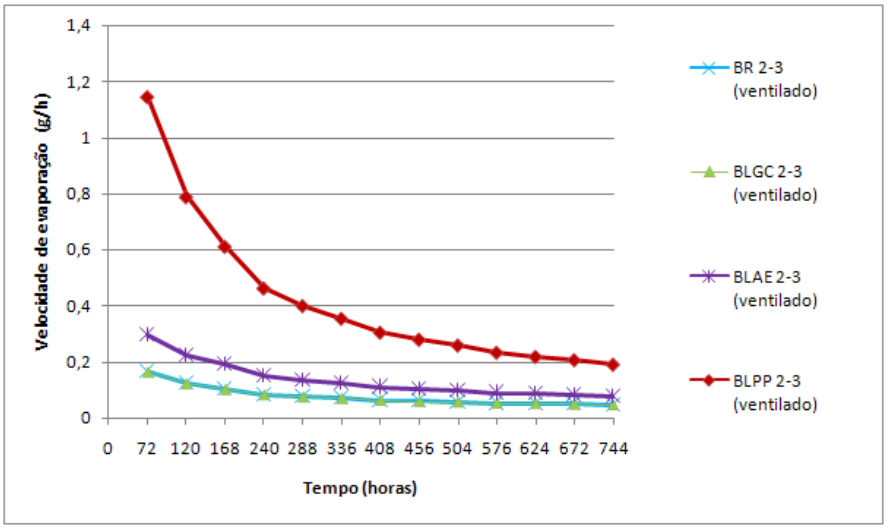


GRÁFICO 7 – COMPARAÇÃO DA VELOCIDADE DE EVAPORAÇÃO ENTRE OS BETÕES (ambiente ventilado)



6.3. VARIAÇÃO DO TEOR DE ÁGUA

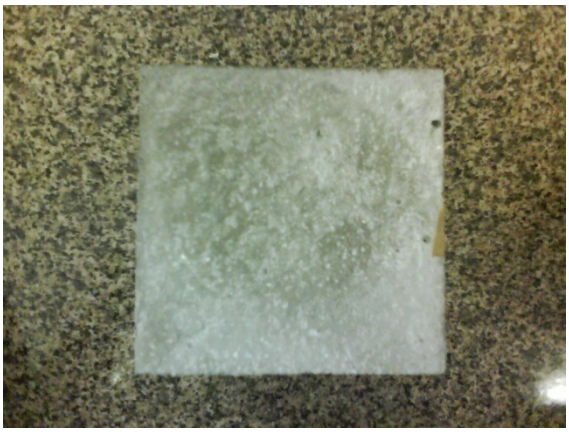
Para determinar a variação do teor de água ao longo do tempo nos provetes de betão, foi utilizado um aparelho que mede, através de um sinal de impedância eléctrica captado por dois pinos, a percentagem de água superficial que determinado material contém. O aparelho utilizado, foi da marca Protimeter e é utilizado como se pode ver na figura seguinte.

FIGURA 46 – DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ÁGUA

É de referir que, os registos efectuados inicialmente nas faces não impermeabilizadas dos provetes, são uma média de diferentes valores medidos nesta face. Tal facto deveu-se ao suporte utilizado para apoiar os provetes aquando do processo de impermeabilização (FIGURA 47), conduzindo a que na superfície destes houvesse uma zona com a forma do suporte em que o teor de água era superior, como se pode ver na FIGURA 48.

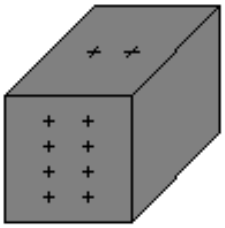
FIGURA 47 – PROVETES COM SUPORTE CILINDRICO

FIGURA 48 – FACE DO PROVETE COM MANCHA CIRCULAR



Para se conhecer a perda de água ao longo do tempo, foram efectuadas várias leituras a todos os provetes de betão. Este processo consistiu em registar os valores indicados no aparelho aquando do contacto dos pinos com a superfície de betão. De modo a ser possível avaliar o teor de água ao longo da espessura do provete, efectuaram-se registos de 2 em 2 cm, incluindo na base (FIGURA 49) obtendo, desta forma, os gráficos apresentados na FIGURA 50.

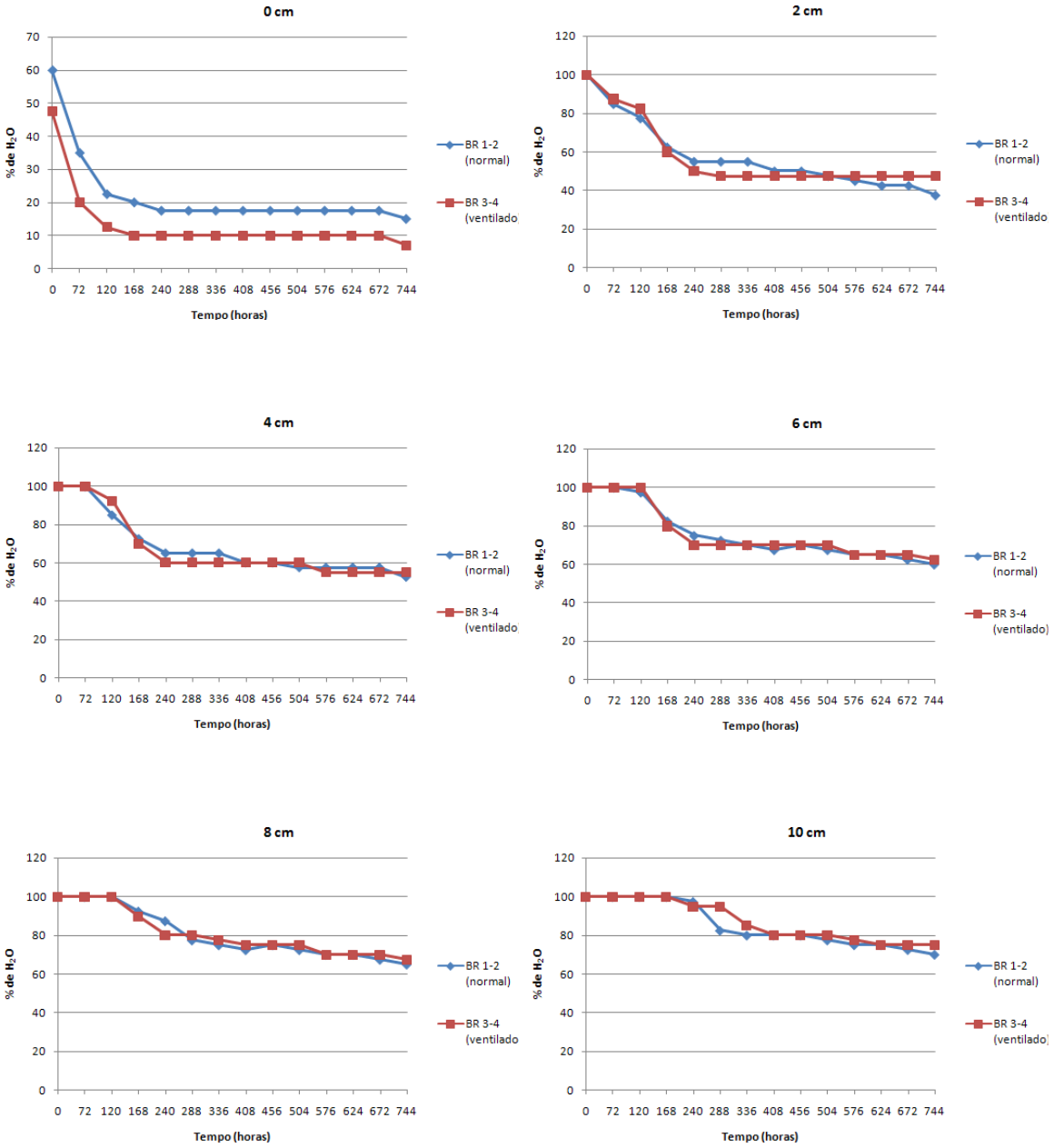
FIGURA 49 – PROVETE MODELO



Através dos gráficos apresentados na FIGURA 50 é possível verificar que o teor de água vai diminuindo ao longo do tempo em qualquer das espessuras, chegando a uma altura em que a % de água apresenta-se mais ou menos constante. Como o processo de secagem é extremamente demorado, é natural que em alguns níveis da espessura, as curvas dos gráficos não estabilizem totalmente, pois o processo de evaporação não está totalmente terminado.

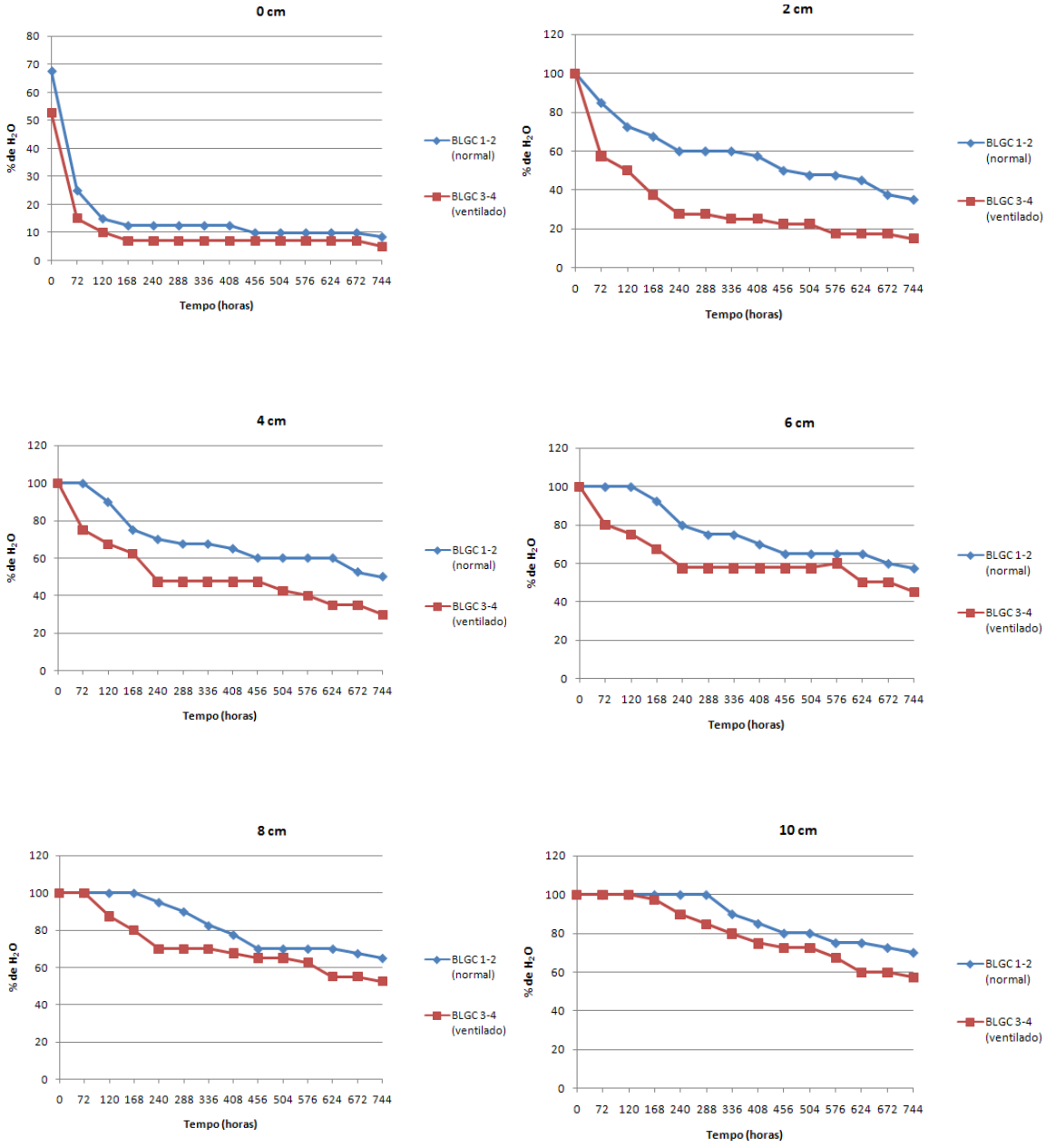
Dos resultados obtidos na face por onde ocorre a evaporação, constata-se que o BR submetido ao ambiente ventilado tem, ao longo do tempo, percentagens de água sempre inferiores ao BR submetido ao ambiente normal. Tal facto não se verifica ao longo da espessura dos provetes, podendo levar a concluir que, para este tipo de betão, a ventilação tem mais influência à superfície, não influenciando os teores de água em profundidade.

FIGURA 50 – PERDA DE ÁGUA AO LONGO TEMPO A DIFERENTES NÍVEIS DE ESPESSURA (BR)



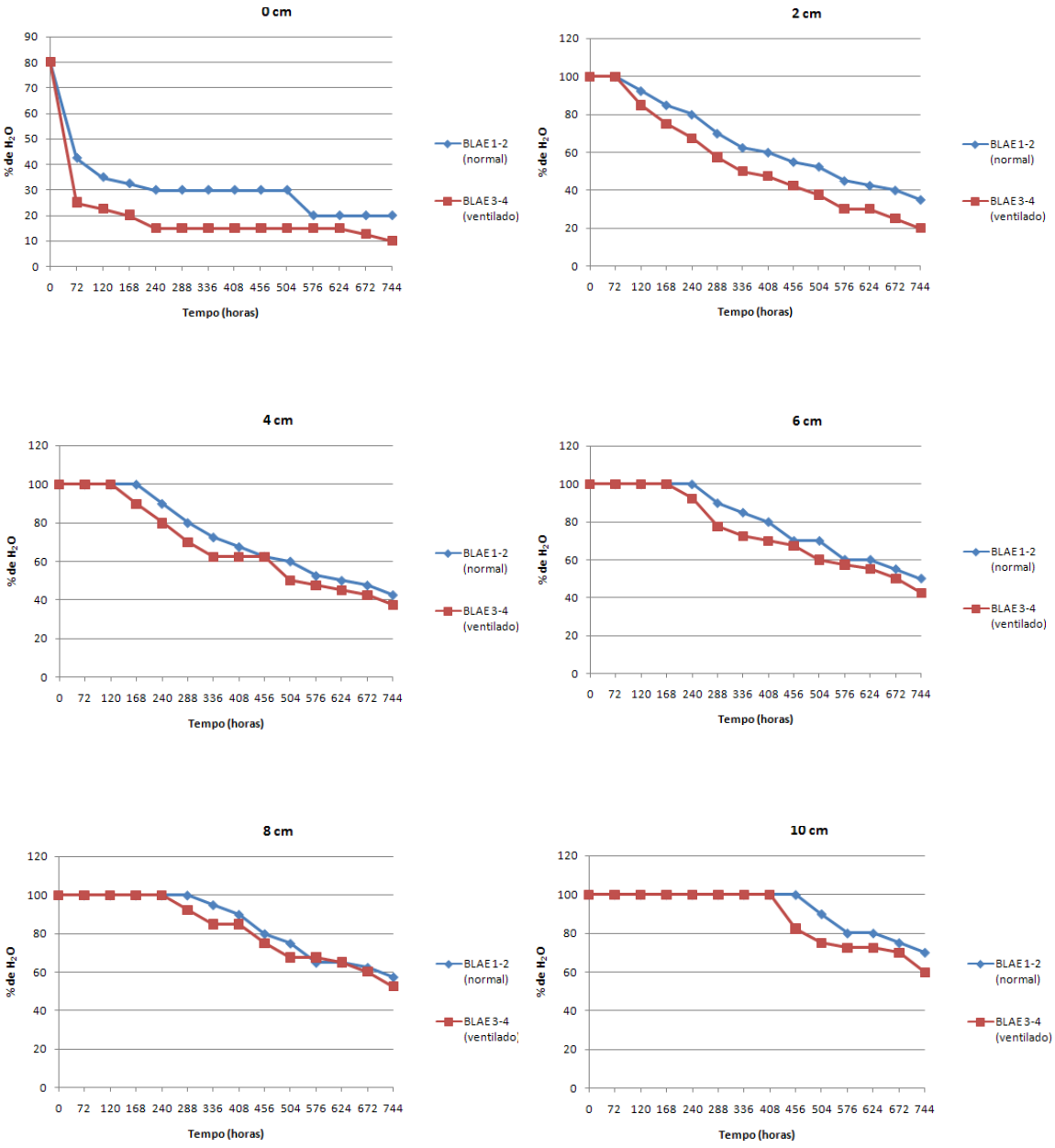
Na FIGURA 51, estão representados os gráficos da % de água dos betões leves de granulado de cortiça. É possível verificar que, tal como no BR, as curvas dos gráficos diminuem com o tempo e tendem a estabilizar. No que diz respeito à influência da ventilação nos resultados obtidos para os diferentes níveis de espessura, o BLGC é diferente do BR, pois os valores dos betões submetidos a ventilação são sempre inferiores aos betões submetidos ao ambiente normal. Esta influência poderá dever-se a uma fraca ligação entre a pasta de cimento e areia e o agregado leve, neste caso o granulado de cortiça, facilitando, deste modo, uma secagem mais rápida em toda a espessura do provete.

FIGURA 51 – PERDA DE ÁGUA AO LONGO DO TEMPO A DIFERENTES NIVEIS DE ESPESSURA (BLGC)



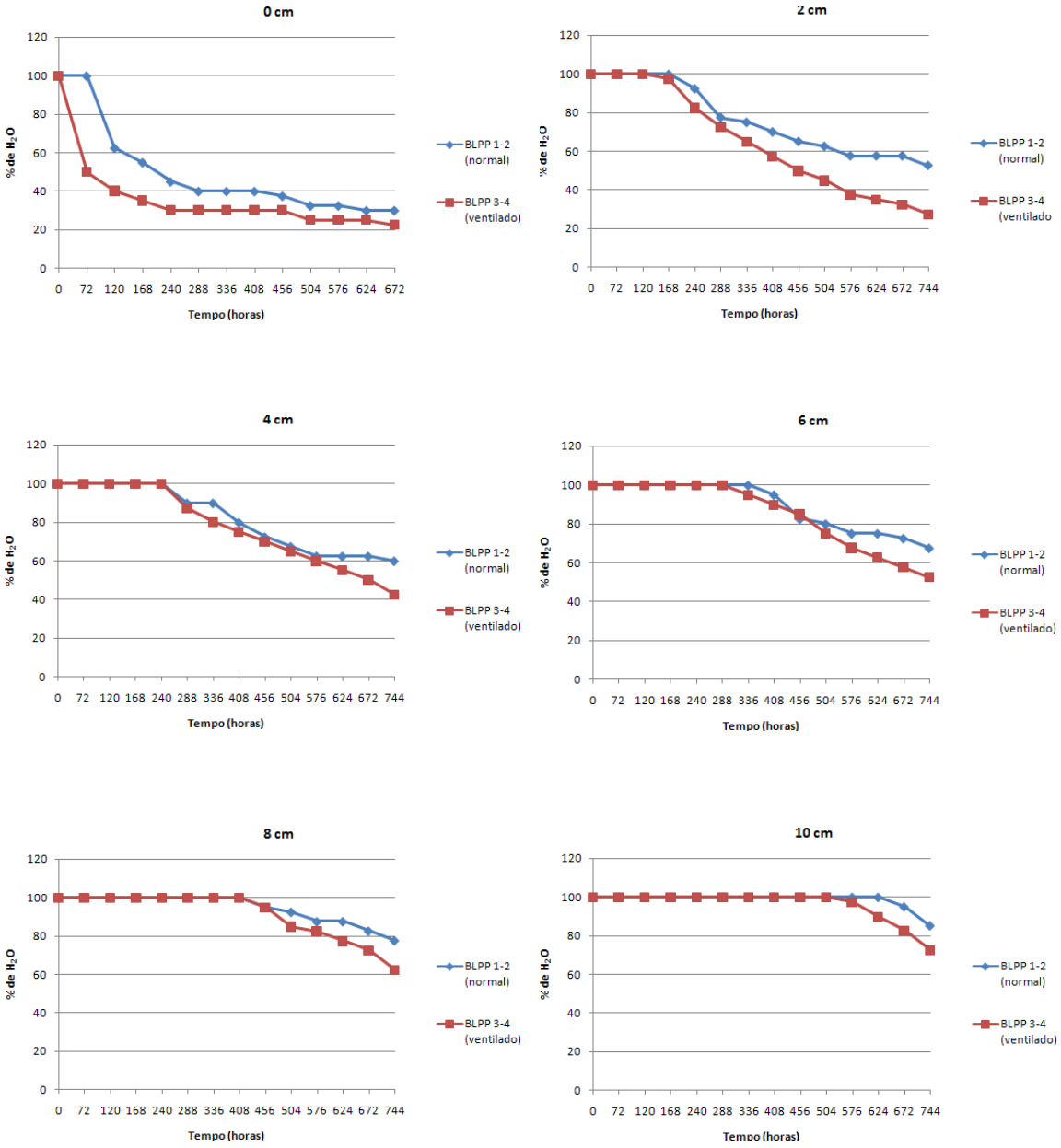
Dos resultados referentes ao BLAE (FIGURA 52), é possível verificar que, tal como no BLGC, os betões submetidos a ventilação apresentam percentagens de água inferiores ao BR, embora neste caso haja uma maior proximidade entre os valores dos dois ambientes, chegando a ser iguais em vários pontos. A melhor aderência entre a pasta e a argila expandida poderá explicar as diferenças menos significativas, em relação ao BLGC, entre os betões submetidos a ambientes distintos.

FIGURA 52 – PERDA DE ÁGUA AO LONGO DO TEMPO A DIFERENTES NIVEIS DE ESPESSURA (BLAE)



Em relação aos resultados referentes ao BLPP apresentados na FIGURA 53, as principais diferenças face aos resultados dos betões já apresentados são ao nível do teor de água, ou seja, o BLPP apresenta valores significativamente superiores de percentagens de água ao longo do tempo e em todos os níveis da espessura, como se vê pelas curvas representadas nos gráficos que têm curvaturas menos acentuadas. Este facto deve-se à incorrecta quantidade de água utilizada na sua formulação. Neste tipo de betão é possível verificar, também, através dos gráficos da FIGURA 53, que os betões submetidos ao ambiente normal nunca apresentam valores de teor de água inferiores aos dos betões ventilados, estando este facto relacionado com o excesso de água que o betão tem na sua constituição, provocando desta forma, uma maior porosidade.

FIGURA 53 – PERDA DE ÁGUA AO LONGO DO TEMPO A DIFERENTES NIVEIS DE ESPESSURA (BLPP)



Em seguida, é feita uma análise comparativa entre os resultados obtidos em cada tipo de betão, em dois níveis de espessura diferentes (0 cm e 4 cm), de forma a demonstrar algumas diferenças entre os betões. No GRÁFICO 8 e GRÁFICO 9 são apresentados os valores do teor de água dos diferentes betões à superfície em ambiente normal e ventilado, respectivamente. Em ambos os ambientes a que foram submetidos os betões, verifica-se que o BLGC é o betão que apresenta menores valores, levando a concluir que tem uma velocidade de secagem mais rápida. Desta forma, é possível admitir que o agregado leve que apresenta melhores características de secagem é a cortiça.

Por outro lado, é possível verificar que o BLPP apresenta, em ambos os ambientes, os valores mais elevados de % de água ao longo do tempo. Para tal deverá contribuir as características do agregado leve em causa (pedra-pomes). A elevada quantidade inicial de água total presente neste betão poderá explicar parte desses resultados, pois provavelmente o agregado não absorveu tanta água como a que seria previsto, levando este tipo de betão a apresentar um tempo de secagem mais lento.

É importante referir que o BR apresenta menores valores de teor de água, em ambos os ambientes, do que o BLAE e o BLPP. Desta forma, é admissível dizer que a brita tem melhores características, face ao tempo de secagem, do que os agregados leves de argila expandida e pedra-pomes.

GRÁFICO 8 – COMPARAÇÃO DO TEOR DE ÁGUA ENTRE OS BETÕES – 0 cm (ambiente normal)

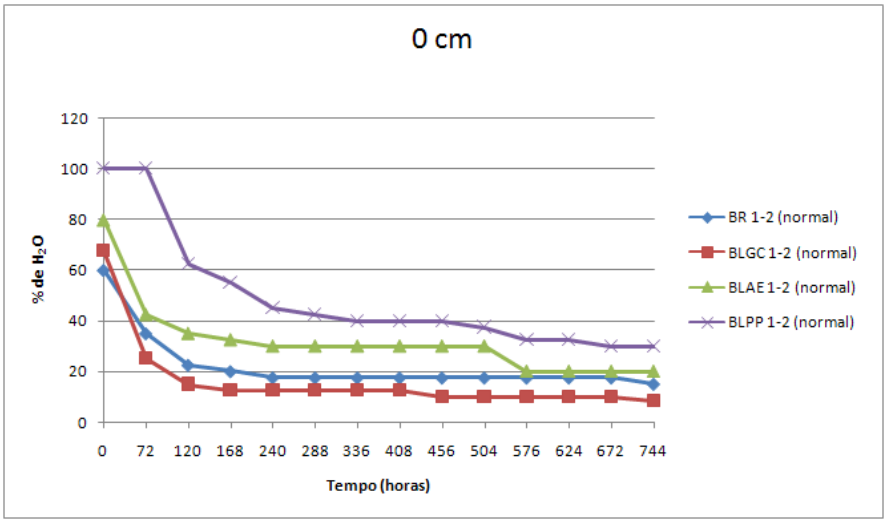
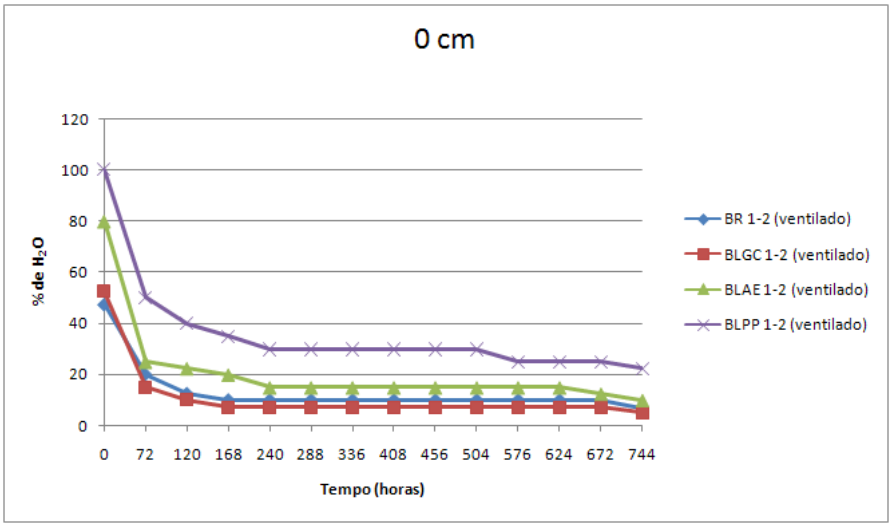


GRÁFICO 9 – COMPARAÇÃO DO TEOR DE ÁGUA ENTRE OS BETÕES – 0 cm (ambiente ventilado)



Nos gráficos seguintes, são apresentados os resultados do teor de água dos diferentes betões, aos 4 cm. Verifica-se que a essa profundidade os resultados apresentam várias diferenças em relação aos 0 cm, principalmente no que diz respeito ao betão com processo de secagem mais rápido. As intercepções entre as diferentes curvas indicam que os teores de água não diminuem linearmente ao longo do tempo.

Ao contrário do que foi apresentado nos gráficos 8 e 9, aos 4 cm, o betão que apresenta, em ambiente normal, uma menor % de água ao fim do tempo de monitorização dos provetes é o BLAE pois, após algum tempo em que o agregado fornece água ao sistema, a secagem ocorre a uma velocidade significativa. No caso dos provetes submetidos a ventilação (GRÁFICO 11), o que apresenta maior secagem é, tal como nos resultados aos 0 cm, o BLGC, pois, tal como já foi mencionado, a pior ligação entre a pasta e o agregado induz uma maior influência da ventilação.

É de referir que, em ambas as profundidades o BLPP apresenta sempre uma secagem mais lenta, excepto no GRÁFICO 11, devido ao facto de a partir do momento em que o agregado deixa de fornecer água ao sistema, a secagem ocorrer de forma rápida quando submetido a ventilação.

GRÁFICO 10 – COMPARAÇÃO DO TEOR DE ÁGUA ENTRE OS BETÕES – 4 cm (ambiente normal)

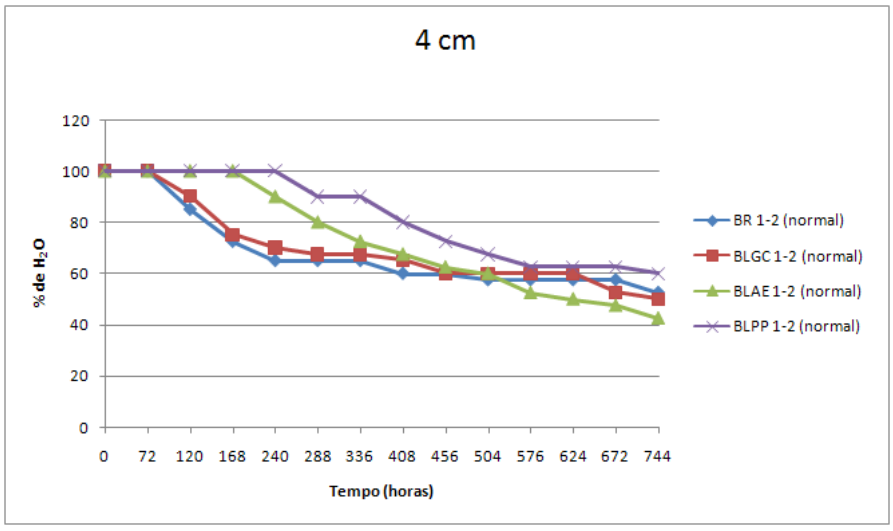
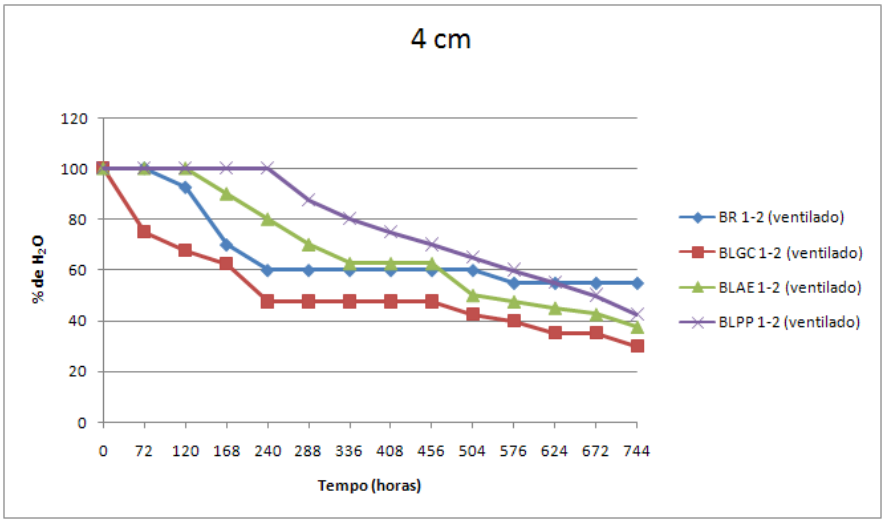


GRÁFICO 11 – COMPARAÇÃO DO TEOR DE ÁGUA ENTRE OS BETÕES – 4 cm (ambiente ventilado)



Nos gráficos seguintes ilustram-se os teores de humidade aproximados em profundidade ao fim de 7 e 15 dias (168 e 336 horas, respectivamente). Através destes gráficos é possível verificar a maneira como decresce o teor de humidade ao longo da altura do provete (h).

FIGURA 54 - TEORES DE HUMIDADE APROXIMADOS AO LONGO DA ALTURA DOS PROVETES (ambiente normal, após 168 horas de secagem)

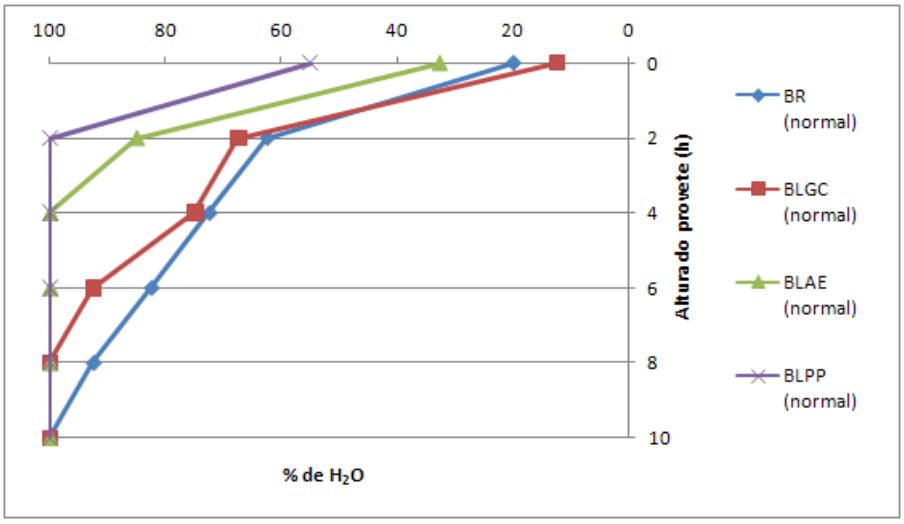
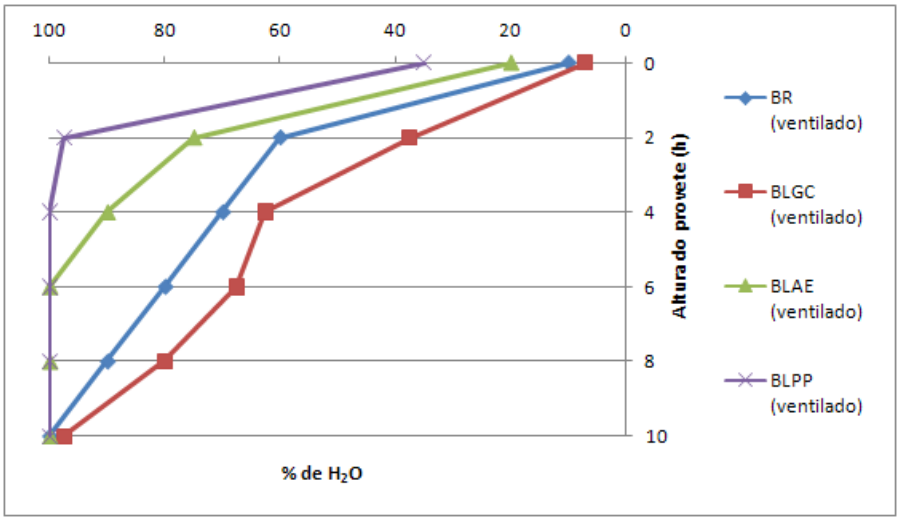


FIGURA 55 - TEORES DE HUMIDADE APROXIMADOS AO LONGO DA ALTURA DOS PROVETES (ambiente ventilado, após 168 horas de secagem)



Através da análise destes gráficos verifica-se que os betões cujo teor de água diminuiu de forma mais acentuada entre os 7 e os 15 dias são o BLPP e o BLAE devido ao facto dos agregados leves em causa libertarem água ao sistema durante os primeiros dias. Após esse tempo inicial, verifica-se uma maior velocidade de secagem por parte desses betões, principalmente no BLAE sendo que no caso do BLPP os resultados estão influenciados pelos erros já referidos.

GRÁFICO 12 – TEORES DE HUMIDADE APROXIMADOS AO LONGO DA ALTURA DOS PROVETES (ambiente normal, após 336 horas de secagem)

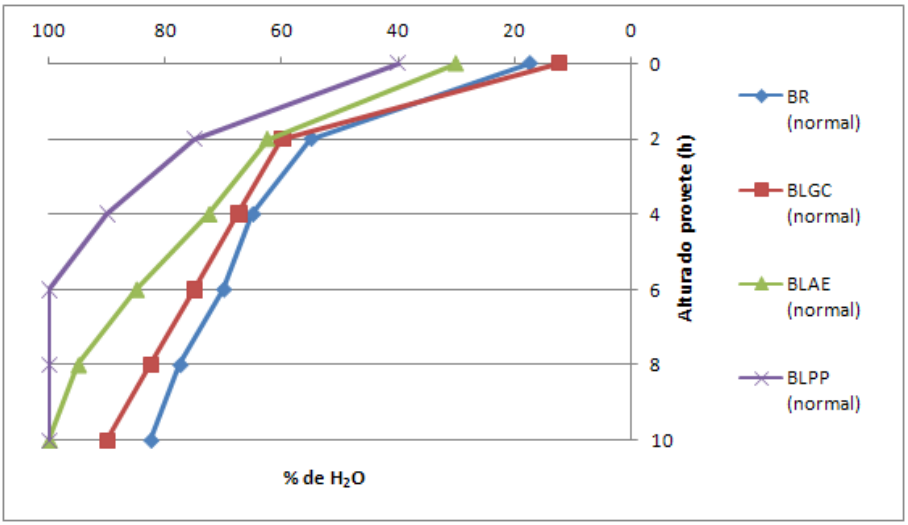
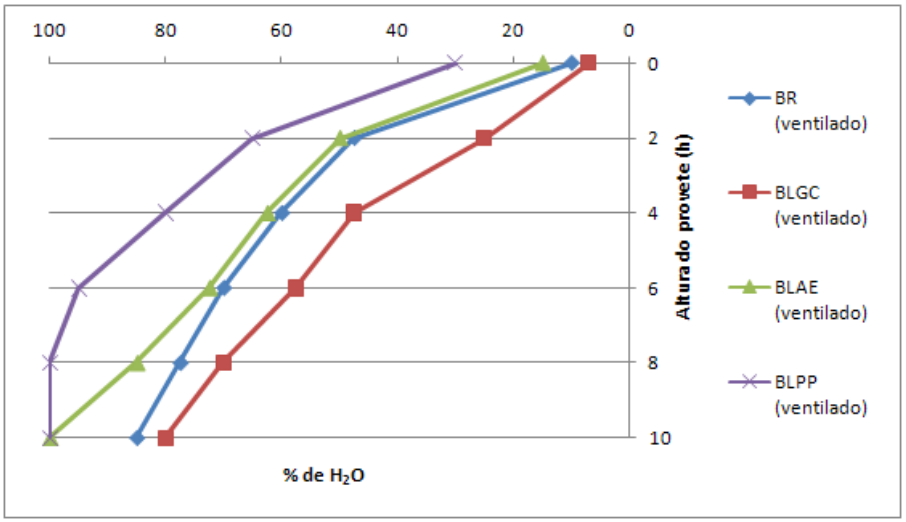


GRÁFICO 13 - TEORES DE HUMIDADE APROXIMADOS AO LONGO DA ALTURA DOS PROVETES (ambiente ventilado, após 336 horas de secagem)



6.4. TEOR DE ÁGUA FINAL EM DIFERENTES ESPESSURAS

De acordo com o referido no Capítulo 3, é importante conhecer o nível de humidade num substrato de betão para colocação de um revestimento sensível à água. Após a colocação de um revestimento impermeável, a humidade redistribui-se no interior do betão, sendo alterado o valor da humidade na superfície em contacto com o revestimento.

Desta forma, são apresentados neste capítulo os valores referentes ao teor de humidade de cada betão, caso fosse aplicado um revestimento impermeável e a humidade se redistribuísse uniformemente em todo o provete. Considerou-se que o teor de humidade em cada espessura equivalia ao teor de humidade num provete com essa espessura. Assim, através da média entre os valores de humidade referentes às várias espessuras, determinou-se o teor de humidade que um betão teria após colocação de um revestimento impermeável. É importante referir que, as considerações acima adoptadas não correspondem totalmente à realidade, devido ao facto dos valores de % água resultarem, ao contrário da realidade, da transição ao longo de toda a espessura do provete,

No GRÁFICO 14, verifica-se que o BR com espessuras de 6, 8 ou 10 cm tem um nível de humidade inferior aos restantes, apresentando assim uma secagem mais rápida. No entanto, considera-se que a diferença para o BLGC não é significante. Em relação aos betões submetidos ao ambiente ventilado (GRÁFICO15), verifica-se o contrário, ou seja, o BLGC seca mais rápido que o BR. Em ambos os ambientes verifica-se que o betão que apresenta uma menor secagem é o BLPP provavelmente devido às razões já indicadas nos pontos anteriores.

GRÁFICO 14 – TEOR DE HUMIDADE FINAL EM PROVETES DE BETÃO COM DIFERENTES ESPESSURAS APÓS 8 DIAS DE SECAGEM (ambiente normal)

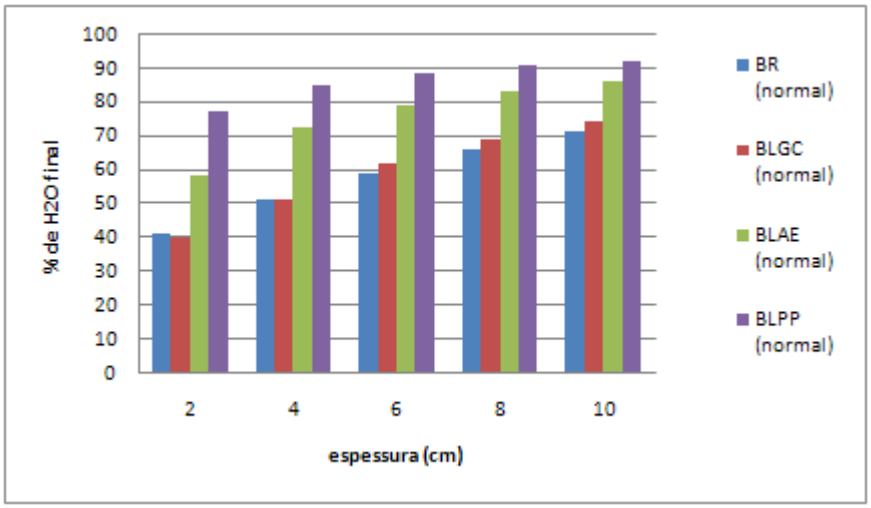
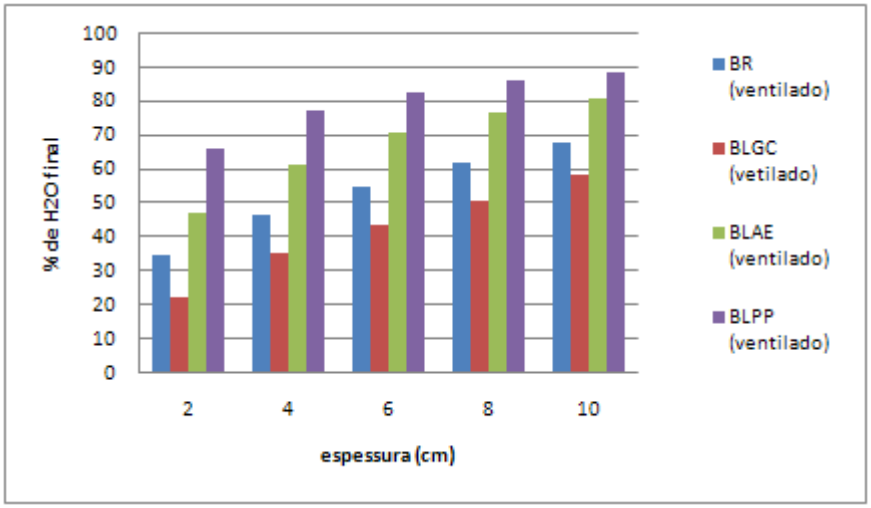


GRÁFICO 15 - TEOR DE HUMIDADE FINAL EM PROVETES DE BETÃO COM DIFERENTES ESPESSURAS APÓS 8 DIAS DE SECAGEM (ambiente ventilado)



Nos gráficos 16 e 17, estão representados os resultados relativos ao teor de humidade nos betões após 15 dias de secagem. Em algumas espessuras verifica-se que os valores não têm grande alteração em relação aos resultados aos 7 dias. Contudo, nota-se que o BLAE regista uma maior diminuição nos valores em relação aos restantes betões, devendo-se este facto ao que já foi anteriormente referido acerca do fornecimento de água do agregado ao sistema.

GRÁFICO 16 - TEOR DE HUMIDADE FINAL EM PROVETES DE BETÃO COM DIFERENTES ESPESSURAS APÓS 15 DIAS DE SECAGEM (ambiente normal)

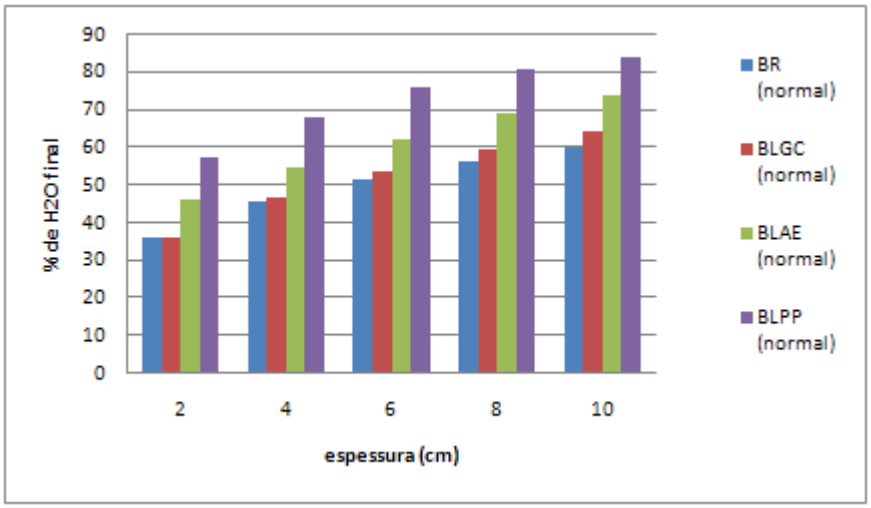
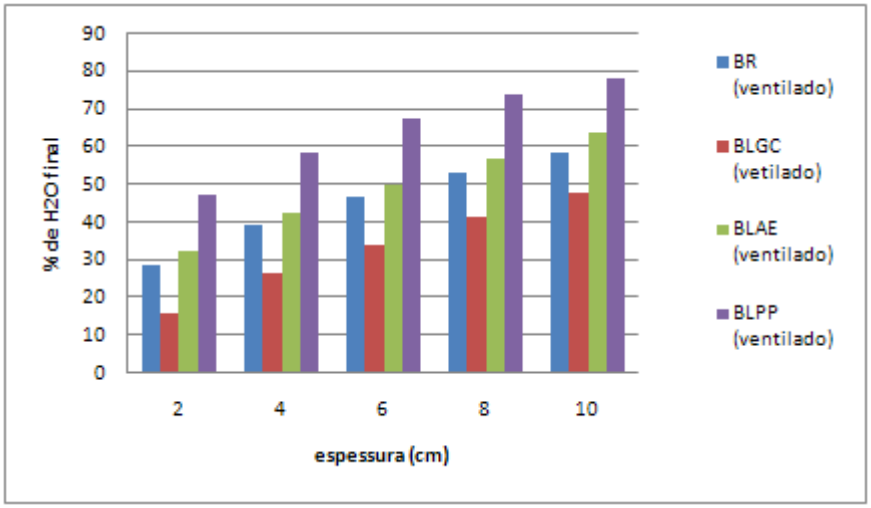


GRÁFICO 17 - TEOR DE HUMIDADE FINAL EM PROVETES COM DIFERENTES ESPESSURAS APÓS 15 DIAS DE SECAGEM (ambiente ventilado)



Finalmente, nos gráficos seguintes, são apresentados os valores do teor de humidade após 30 dias de secagem. Tal como foi acima referido, o BLAE em ambiente ventilado apresentou novamente uma redução significativa do teor de humidade. Para provetes de betão com espessura superior a 6 cm, o BLAE apresenta, após 30 dias de secagem, os menores valores de humidade em relação aos restantes betões. Contudo, a diferença em relação ao BR e ao BLGC não é significativa, pois os valores diferem apenas em cerca de 5 % de teor de água.

Nos betões submetidos ao ambiente ventilado, nada se alterou, apresentado o BLGC o menor tempo de secagem, ao contrário do BLPP que apresenta os valores mais elevados de % de água.

GRÁFICO 18 - TEOR DE HUMIDADE FINAL EM PROVETES DE BETÃO COM DIFERENTES ESPESSURAS APÓS 30 DIAS DE SECAGEM (ambiente normal)

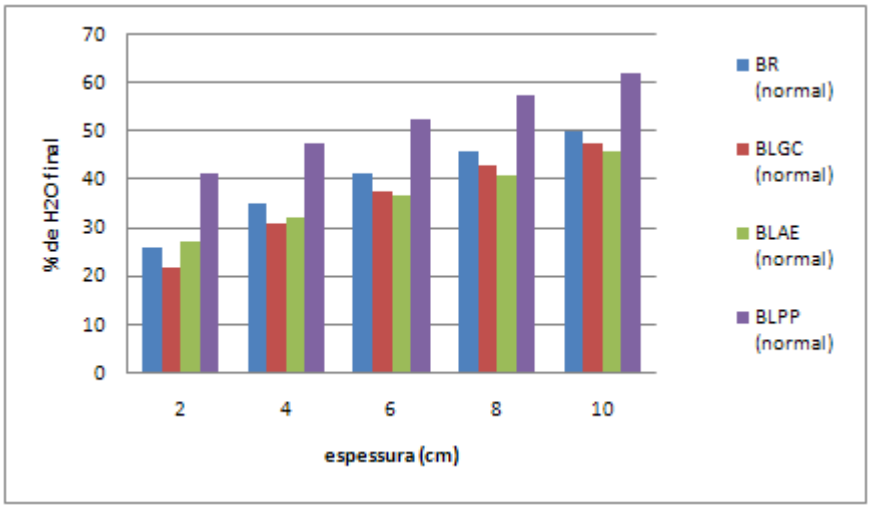
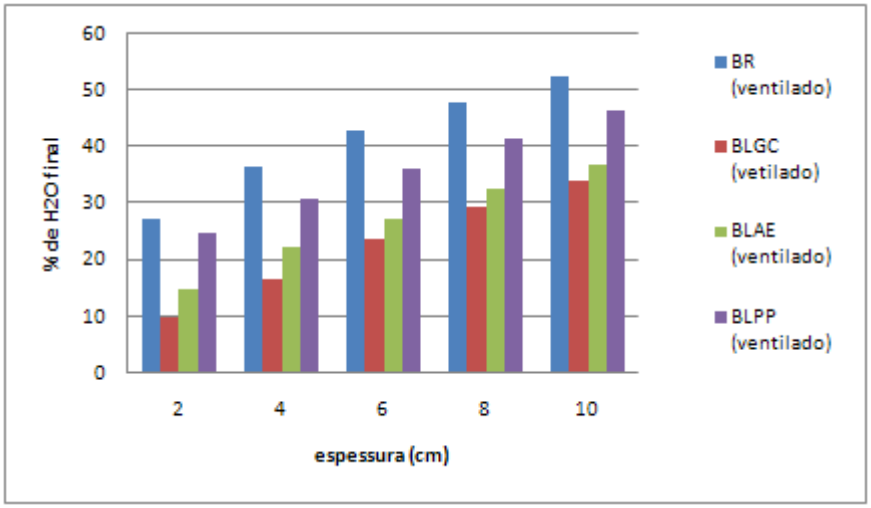


GRÁFICO 19 - TEOR DE HUMIDADE FINAL EM PROVETES COM DIFERENTES ESPESSURAS APÓS 30 DIAS DE SECAGEM (ambiente ventilado)



Após feita a análise ao teor de humidade dos "betões com diferentes espessuras", e submetidos a diferentes tempos de secagem, é possível concluir que o BLPP, independentemente da espessura ou do ambiente a que os provetes foram submetidos, apresenta sempre os maiores valores de teor de humidade (resultados influenciados pela incorrecta quantidade de água total considerada na sua composição). Em relação aos restantes betões verifica-se, em ambiente normal, alguma semelhança entre os valores, enquanto no ambiente ventilado, é possível concluir que o BLGC apresenta, em todos os casos, uma secagem mais rápida. Este facto deve-se à pior ligação existente entre a pasta de cimento e areia e o granulado de cortiça, originando assim uma maior diferença de resultados entre os ambientes.

6.5. HUMIDADE RELATIVA INTERIOR DO BETÃO

Tal como já foi mencionado, foram confeccionados dois provetes de BLAE, com 2 orifícios cada, para poder medir, através de um medidor de humidade, a humidade relativa interior do betão em duas profundidades diferentes. O aparelho utilizado foi o modelo HM34 da marca Vaisala.

Inicialmente, não estava previsto no âmbito do trabalho analisar a humidade relativa interior do betão, contudo, por curiosidade, optou-se por analisar este parâmetro em apenas um tipo de betão e em duas profundidades de modo a verificar a maneira como a humidade interior varia ao longo do tempo.

A diferença entre os dois provetes de betão acima referidos, é em relação aos furos. Em ambos os provetes foram feitos dois furos, com profundidades de 4 e 8 cm, sendo que num deles os furos localizam-se na face de enchimento que corresponde à face não impermeabilizada, enquanto no outro provete, os furos foram feitos numa das faces laterais, sendo esta uma das faces impermeabilizadas. A razão pela qual se fez os furos em diferentes faces foi o facto de o medidor de humidade registar a humidade ao longo de todo o comprimento do furo, levando a que no caso dos furos na face de enchimento, os resultados da humidade fossem representativos de toda a humidade até à profundidade de 4 e 8 cm.

Na figura seguinte é possível verificar o método utilizado para monitorizar os valores de humidade interior do betão ao longo do tempo. Como podemos observar, são colocados nos furos uma espécie de rosca metálica com uma tampa para que os provetes não percam humidade pelos furos. Quando era feita a leitura retiravam-se a tampa e colocava-se a sonda (antena) do medidor de humidade. Após alguns segundos o aparelho fornecia o valor da humidade relativa interior do betão à profundidade a que fora colocada a sonda.

FIGURA 56 – MEDIÇÃO DA HUMIDA RELATIVA INTERIOR DO BETÃO

Desta forma, são apresentados nos gráficos 20 e 21 os resultados obtidos ao fim das 14 leituras efectuadas ao longo de um mês.

Entende-se como "furos verticais" os orifícios na face não impermeabilizada, e "furos horizontais" os furos numa das faces impermeabilizadas.

É possível verificar, através dos gráficos seguintes, que os valores da humidade relativa interior do betão decresce muito lentamente, sendo que ao fim de um mês as curvas apresentadas nos gráficos ainda não estabilizaram. Nota-se também que não existem grandes diferenças entre os valores registados às diferentes profundidades, podendo, desta forma, indicar que a humidade interior do betão é, de certa forma, homogénea.

Devido aos diferentes furos, é possível verificar que os resultados referentes aos "furos horizontais" são sempre superiores aos dos "furos verticais", devido ao facto da humidade se redistribuir no furo, ou seja, nos furos horizontais a humidade registada é sempre da mesma profundidade, enquanto nos furos verticais os resultados indicam a humidade redistribuída ao longo da profundidade.

GRÁFICO 20 – HUMIDADE RELATIVA INTERIOR DO BETÃO (HR) À PROFUNDIDADE DE 4 CM

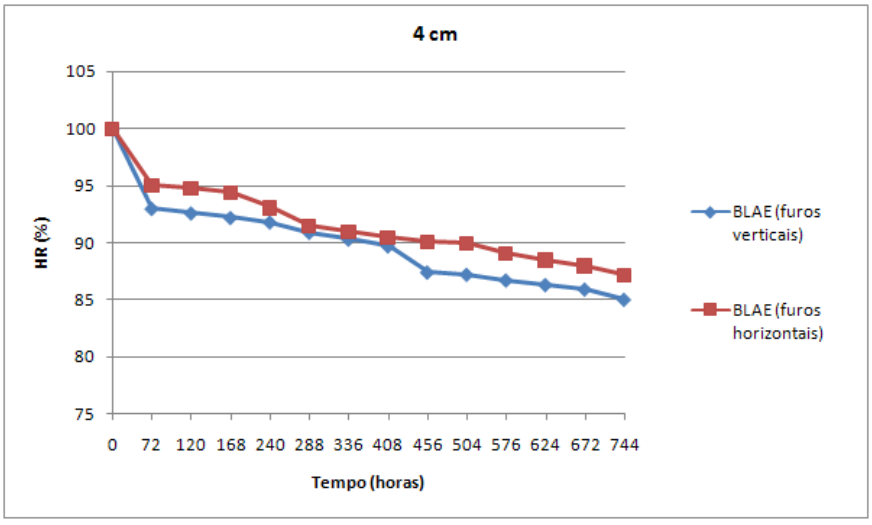
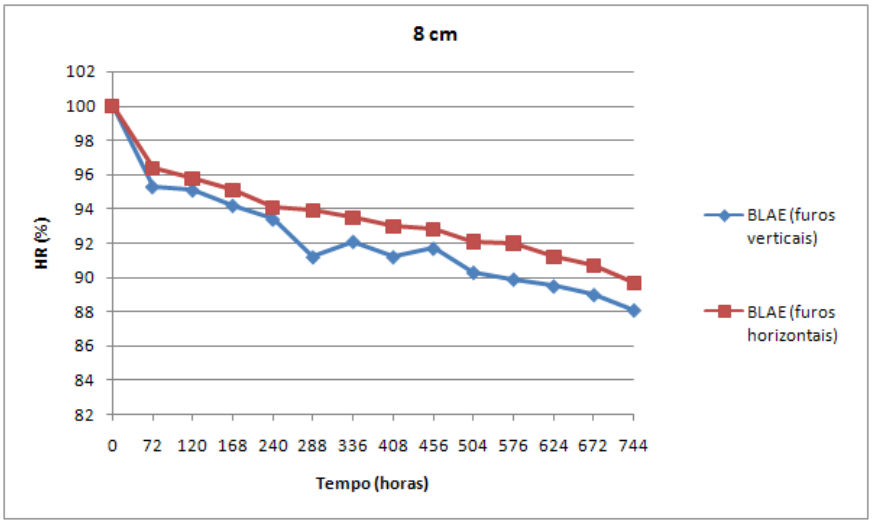


GRÁFICO 21 – HUMIDADE RELATIVA INTERIOR DO BETÃO (HR) À PROFUNDIDADE DE 8 CM



7. CONCLUSÕES

Com a realização deste trabalho, foi possível verificar a influência que os agregados leves têm na secagem dos betões.

7.1. CONCLUSÕES GERAIS

Através de uma análise conjunta aos resultados obtidos nos ensaios realizados na condição deste trabalho, é possível concluir os seguintes pontos:

- O BLGC apresenta o menor tempo de secagem entre os betões estudados, podendo-se desta forma aferir que o granulado de cortiça é um bom agregado leve, ao nível do processo de secagem, para a composição de um betão com aplicação em camadas de forma;

- O BLAE apresenta tempos de secagem intermédios, verificando-se que entre os 15 e os 30 dias perde uma maior quantidade de água que os restantes betões, apresentando-se deste modo, como uma boa solução, após 30 dias de secagem, para aplicação em camadas de forma;

- O BLPP, embora apresente a maior perda de água nas primeiras horas, apresenta um tempo de secagem mais lento que os restantes betões. Devido ao erro cometido aquando da formulação da composição deste betão, não se pode concluir, através dos resultados obtidos, que a pedra-pomes não é uma boa solução para um betão com aplicação em camadas de forma. Contudo, é expectável referir que a pedra-pomes poderá ter um comportamento semelhante à argila expandida, pois como se verificou, a partir dos 15 dias de secagem o teor de água no BLPP decresce significativamente face aos restantes betões (à excepção do BLAE).

- Os resultados referentes ao BR indicam que este pode ser uma boa solução para camadas de forma. Contudo, devido ao seu peso, este tipo de betão não é utilizado para este fim, tendo sido confeccionado apenas para servir de referência aos restantes betões;

- Os teores de humidade água em betões leves com 10 cm de espessura, após 30 dias de secagem em ambiente normal, são os seguintes: BLGC – 48 %; BLAE – 46 %; BLPP – 62 %.

No que diz respeito aos betões submetidos a um ambiente ventilado, conclui-se que estes apresentam menores tempos de secagem. A ventilação poderá ser assim um método viável

para acelerar o processo de secagem, reduzindo os valores finais de teor de água (ao fim de um mês) em cerca de 10%.

7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

No âmbito deste trabalho, seria interessante determinar a humidade nos betões de forma mais exacta. A monitorização dos provetes através de sondas com ligação a um data logger (aparelho que regista e processa a informação proveniente das sondas) permitiria conhecer vários parâmetros do betão de modo contínuo.

Existem vários tipos de materiais que são utilizados como agregados leves, sendo os utilizados neste trabalho os mais usuais. Contudo, seria interessante elaborar o mesmo tipo de trabalho com composições diferentes, nomeadamente com outros tipos de agregados leves, tais como a esferovite, ou introdutores de ar, de modo a verificar o tempo de secagem dos betões com estes agregados.

Como forma de acelerar o processo de secagem, poderão, no futuro, ser testados outros métodos, tais como a utilização de desumidificadores ou aquecedores. A alteração das condições de humidade e temperatura também pode influenciar o tempo de secagem. Deste modo, seria interessante simular as condições ambientais, por exemplo dos Açores em que a humidade é muito elevada (cerca dos 90%), para se perceber a influência que tem no tempo de secagem.

8. BIBLIOGRAFIA

[1] VIEIRA, M. G., - *"Betões de elevado desempenho com agregados leves. Durabilidade e microestrutura"*, Lisboa. IST/LNEC, 2000. Dissertação de Mestrado

[2] SOUSA, A. G. R. S., - "*Reabilitação de pavimentos correntes de edifícios"*, Lisboa. IST, 2008. Dissertação de Mestrado

[3] IPQ – INSTITUTO PORTUGÊS DA QUALIDADE, "Betão. Especificação, desempenho, produção e conformidade", Norma Portuguesa, NP EN 206 - 1, IPQ, Lisboa, 2007

[4] IPQ – INSTITUTO PORTUGÊS DA QUALIDADE, "Agregados Leves. Parte1: Agregados Leves para Betões, Argamassas e Caldas de Injecção", Norma Portuguesa, NP EN 13055 - 1, IPQ, Lisboa, 2005

[5] MARQUES, J. C. R., - *"Caracterização de betões leves de regranulados de cortiça"*, Lisboa. IST, 2008. Dissertação de Mestrado

[6] COUTINHO, A. DE SOUSA., - "Fabrico e propriedades do betão", Lisboa. LNEC, 1988

[7] SILVA, B., "Betão Leve Estrutural Usando Agregados de Argila Expandida", Porto. FEUP.

[8] ROSSIGNOLO, J.A. & AGNESINI, M.V.C. - *"Concreto: ensino, pesquisa e realizações. Concreto Estrutural Leve."* IBRACON, São Paulo, 2005. Volume 2.

[9] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, - "Guide for structural lightweight aggregate concrete." ACI 213R-87. USA, 1999.

[10] LOURENÇO, J. et al., - "Betões de Agregados Leves de Argila Expandida", Lisboa. APEB, 2004

[11] BRANCO, F.G. et al., "Avaliação Utilização da cortiça como agregado em betões", Coimbra.

[12] GIL, L., - *"Cortiça. Produção, Tecnologia e Aplicação"*, Lisboa. INETI, 1996

[13] PEREIRA, H., - "Chemical composition and variability of cork from Quercus suber L." ood Sci Technol, 1988

[14] EuroLightCon (1998a) – "LWAC properties, state of art", European Union, Noruega, 1998.

[15] Fergestad (2000) – “LWC in Norwegian bridges”, Congresso do ACI, E.U.A

[16] Solovieva, O. V. (1966) – “Composição e aptidão à expansão de rochas argilosas”, keramzit e agloporit, Ministério de Geologia, Moscovo

[17] RILEY, C. M., “Relation of chemical properties to the bloating of clays”, Journal of American Ceramic Society, Vol.34, N.4, Apr. 1951, pp 78-82

[18] SILJAN MARTIN, A study of impact factors in the L.W.A. production process with emphasis on the kiln process [Dr. Ing. Thesis]. Norwegian University of Sciense and Technology, 2000

[19] PRATES, M.J.L., - “Características *e Comportamento Mecânico de Aglomerados Negros de Cortiça”*, Lisboa. IST, Setembro 1993. Dissertação de Mestrado pp. 11-34

[20] Mineral Information Institute, - http://www.mii.org/Minerals/photopumice.html

[21] Gündüz, L., - “The effects of pumice aggregate/cement ratios on the low-strength concrete properties”, Construction and Building Materials 22 (2008)

[23] IPQ – INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE, “Cimento – Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes”, Norma Portuguesa, NP EN 197-1, IPQ, Lisboa,

[24] IPQ – INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE, “Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica”, Norma Portuguesa, NP EN 933-1 2000, IPQ, Lisboa, Novembro 2000, 16p.

[25] CEN – COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, “Lightweight aggregates – Part 1: Lightweight aggregates for concrete and mortar and grout”, Norme Européenne, EN 13055-1, 2002, 24p.

[26] IPQ – INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE, “Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios”, Norma Portuguesa, NP EN 1097-3:2003, IPQ, Lisboa, 2003

[27] IPQ – INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE, “Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água”, Norma Portuguesa, NP EN 1097-6 2003, IPQ, Lisboa, Dezembro 2003, 16p.

[28] IGPAI, “Agregados para argamassas e betões. Análise granulométrica”, Norma Portuguesa Definitiva, NP 1379, 1976, 3p.

[29] IGPAI, “Agregados para argamassas e betões. Determinação da baridade”, Norma Portuguesa Definitiva, NP 955, 1973, 2p.

[30] SILVA, B. M. M., - “*Betão Leve Estrutural Com Agregados de Argila Expandida*”, Porto. FEUP, 2007. Dissertação de Mestrado

[32] TAVARES, A. S., VIEIRA, R.R., “Expo 98 Portuguese National Pavilion A Large use of Lightweight Structural Concrete”, Proceedings of the 12th Ready Mixed Concrete Congress, ERMCO, APEB, Vol.2, Lisbon, 23-25 June 1998, pp. 874-882.

[33] GIL, L., “A cortiça como material de construção. Manual Técnico”, APCOR – Associação Portuguesa de Cortiça

[34] IGPAI, “*Determinação da massa volúmica do betão fresco”*, Norma Portuguesa Definitiva, NP 1384, Lisboa, 1976, 3p.

[35] IPQ – INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE, “Ensaios do betão fresco. Parte 5: Ensaio de espalhamento”, Norma Portuguesa, NP EN 12350-5:2009, IPQ, Lisboa, 2009.

[36] Lezell, Cláudia, “Concrete: When Do You Know It’s Dry?” August 23, 2007. (http://www.randrmagonline.com/Articles/Feature_Article/BNP_GUID_9-5-2006_A_10000000000000155900) (4 de Julho 2009)

[37] Lopes, E.M., - *“A Influência da humidade do substrato no desempenho de revestimentos de piso de edifícios”,* Tese de Mestrado, Universidade de São Paulo, Brasil, Escola Politécnica, 2004.

[38] Hendenblad, G., Concrete Drying Time – Predict concrete drying times before placing floor coverings, Concrete Technology Today, PL982, Portland Cement Addociation, Vol. 19, nº2, July 1998

[39] HENDENBLAD, G., “Drying of construction water in concrete”. Stockholm: Swedish Council for Building Research, 1996.

[40] POWERS, T.C., “A discussion of cement hydration in relation to the curing of Concrete.” Washington: Highway Research Board, 1947.

[41] NILSSON, L.O., Hygroscopic moisture in concrete – drying measurements and related material properties. Lund: Lund Institute of Technology, Division of Building Materials, 1980.

[42] ACI Committee 302, “Guide for Concrete Slabs that Receive Moisture-Sensitive Flooring Materials” ACI 302.2R-06

[43] BRANCO, F.G. et al., “Avaliação experimental do tempo de secagem de argamassas de agregados leves”, Coimbra.

[44] ASTM E 1907-97 – “Standard Practices for Determining Moisture-Related Acceptability of Concrete Floors to Receive Moisture Sensitive Finishes”, USA, 1997

[45] NASCIMENTO, J. M., “Bases de assentamento de revestimentos de pisos resilientes”, ITE 38, LNEC, Lisboa, 1995.

[46] APPLETON, J., “CONSTRUÇÕES EM BETÃO – Nota histórica sobre a sua evolução”

[47] http://www.secil.pt/default.asp?pag=catalog (10-9-2009)

[48] MEDEIROS, C., “Caracterização Mecânica de Betões Leves”, Lisboa, IST, 2009. Dissertação de Mestrado (fase provisória)

ANEXOS

ANEXO 1 – Análise Granulométrica

Areia Amarela

Data de ensaio 26-Mar-09		**Material:** Areia Amarela **Massa da amostra (g):** 1000,2			
Peneiro	**Malha [mm]**	**Resíduo**		**Resíduo acumulado**	
				Passado	**Retido**
		[g]	**[%]**	**[%]**	**[%]**
6"	**152,4**			100,00	0,00
4"	**101,6**			100,00	-
3"	**76,2**			100,00	0,00
2"	**50,8**			100,00	-
1"1/2	**38,1**			100,00	0,00
1"	**25,4**			100,00	-
3/4"	**19,1**			100,00	0,00
1/2"	**12,7**			100,00	-
3/8"	**9,52**	0,0	0,00	100,00	0,00
1/4"	**6,35**	5,6	0,56	99,44	-
Nº4	**4,76**	4,7	0,47	98,97	1,03
Nº8	**2,38**	52,8	5,29	93,68	6,32
Nº16	**1,19**	264,5	26,48	67,21	32,79
Nº30	**0,59**	427,0	42,74	24,46	75,54
Nº50	**0,297**	184,2	18,44	6,03	93,97
Nº100	**0,149**	52,5	5,26	0,77	99,23
Nº200	**0,074**				
Refugo	**-**	7,7	0,77	-	-
Totais		999,0	100,00	-	308,88
Módulo de finura					3,09

Granulado de Cortiça 2-9

Data de ensaio 26-Mar-09		**Material:** Granulado de Cortiça Expandida **Massa da amostra (g):** 1002,4			
Peneiro	**Malha [mm]**	**Resíduo**		**Resíduo acumulado**	
				Passado	**Retido**
		[g]	**[%]**	**[%]**	**[%]**
6"	**152,4**			100,00	0,00
4"	**101,6**			100,00	-
3"	**76,2**			100,00	0,00
2"	**50,8**			100,00	-
1"1/2	**38,1**			100,00	0,00
1"	**25,4**			100,00	-
3/4"	**19,1**			100,00	0,00
1/2"	**12,7**			100,00	-

3/8"	**9,52**			100,00	0,00
1/4"	**6,35**	168,4	17,02	82,98	-
Nº4	**4,76**	217,2	21,95	61,03	38,97
Nº8	**2,38**	432,5	43,71	17,31	82,69
Nº16	**1,19**	157,9	15,96	1,35	98,65
Nº30	**0,59**	12,8	1,29	0,06	99,94
Nº50	**0,297**	0,6	0,06	0,00	100,00
Nº100	**0,149**	0,0	0,00	0,00	100,00
Nº200	**0,074**	-			
Refugo	**-**	0,0	-	-	-
Totais		989,4	100,00	-	520,24
Módulo de finura					5,2

Argex 2-4

Data de ensaio		**Material:** Argex 2-4			
26-Mar-09		**Massa da amostra (g):** 1000,3			
Peneiro	**Malha [mm]**	**Resíduo**		**Resíduo acumulado**	
				Passado	**Retido**
		[g]	**[%]**	**[%]**	**[%]**
6"	**152,4**			100,00	0,00
4"	**101,6**			100,00	-
3"	**76,2**			100,00	0,00
2"	**50,8**			100,00	-
1"1/2	**38,1**			100,00	0,00
1"	**25,4**			100,00	-
3/4"	**19,1**			100,00	0,00
1/2"	**12,7**			100,00	-
3/8"	**9,52**	0	0,00	100,00	0,00
1/4"	**6,35**	54,6	5,46	94,54	-
Nº4	**4,76**	113,8	11,38	83,16	16,84
Nº8	**2,38**	394	39,39	43,77	56,23
Nº16	**1,19**	344,9	34,48	9,29	90,71
Nº30	**0,59**	52,9	5,29	4,00	96,00
Nº50	**0,297**	24,3	2,43	1,57	98,43
Nº100	**0,149**	7,2	0,72	0,85	99,15
Nº200	**0,074**	-	-	-	-
Refugo	**-**	8,5	0,85	-	-
Totais		1000,2	100,12	-	457,36
Módulo de finura					4,57

Pedra-pomes

Data de ensaio		Material: Pedra-pomes Massa da amostra (g): 1034,3			
Peneiro	Malha [mm]	Resíduo		Resíduo acumulado	
				Passado	Retido
		[g]	[%]	[%]	[%]
6"	152,4			100,00	0,00
4"	101,6			100,00	-
3"	76,2			100,00	0,00
2"	50,8			100,00	-
1"1/2	38,1			100,00	0,00
1"	25,4			100,00	-
3/4"	19,1			100,00	0,00
1/2"	12,7			100,00	-
3/8"	9,52			100,00	0,00
1/4"	6,35			100,00	-
Nº4	4,76	215,4	20,83	79,17	20,83
Nº8	2,38	296	28,62	50,56	49,44
Nº16	1,19	153,4	14,83	35,72	64,28
Nº30	0,59	47	4,54	31,18	68,82
Nº50	0,297	26,6	2,57	28,61	71,39
Nº100	0,149	44,1	4,26	24,34	75,66
Nº200	0,074				
Refugo	-	251,8	24,34	-	-
Totais		1034,3	100,00	-	350,41
Módulo de finura					3,5

ANEXO 2 – Baridade dos Agregados

Baridade - Areia Amarela

NP- 955- 1973		Recipiente		Material:	Areia Amarela		
				Data de ensaio:		26-Mar-09	
Dmáx	Capacidade nominal [dm^3]	Capacidade efectiva V [dm^3]	Massa m_1 [kg]	Massa do recipiente cheio com o agregado m_2 [kg]		Baridade do agregado seco ($m_2 - m_1$)/V *1000 [kg/m^3]	
2,38	3	3	1,8557	Compactado	6,80	1648,13	1650
				Não Compactado	6,51	1551,57	1550

Baridade – Argex 2-4

NP- 955- 1973		Recipiente		Material:	Argex 2-4		
				Data de ensaio:		26-Mar-09	
Dmáx	Capacidade nominal [dm^3]	Capacidade efectiva V [dm^3]	Massa m_1 [kg]	Massa do recipiente cheio com o agregado m_2 [kg]		Baridade do agregado seco ($m_2 - m_1$)/V *1000 [kg/m^3]	
6,35	3	3	1,8557	Compactado	3,34	493,97	490
				Não Compactado	3,26	468,40	470

Baridade – Cortiça Expandida

NP- 955- 1973		Recipiente		Material:	Cortiça Expandida 2-9		
				Data de ensaio:		26-Mar-09	
Dmáx	Capacidade nominal [dm^3]	Capacidade efectiva V [dm^3]	Massa m_1 [kg]	Massa do recipiente cheio com o agregado m_2 [kg]		Baridade do agregado seco ($m_2 - m_1$)/V *1000 [kg/m^3]	
9,52	3	3	1,8557	Compactado	2,12	87,97	90
				Não Compactado	2,09	77,97	80

Baridade – Pedra-pomes

NP- 955- 1973		Recipiente		Material:	Pedra-pomes		
				Data de ensaio:		26-Mar-09	
Dmáx	Capacidade nominal [dm^3]	Capacidade efectiva V [dm^3]	Massa m_1 [kg]	Massa do recipiente cheio com o agregado m_2 [kg]		Baridade do agregado seco ($m_2 - m_1$)/V *1000 [kg/m^3]	
6,35	3	3	1,8557	Compactado	3,738		630
				Não Compactado	3,654		600

ANEXO 3 – Massa Volúmica e Absorção de Água

Areia Amarela

Método do picnómetro para partículas de agregados de dimensão entre 0,063 mm e 4 mm		
Data de ensaio: 07-04-2009		
Amostra		
Descrição da amostra: Areia Amarela		
Máxima dimensão do agregado da amostra (mm)		4,76
Massa do provete de ensaio (kg)		605,2
Volume do picnómetro (entre 500 ml a 5000 ml)		1000
Massa do agregado saturado com a superfície seca ao ar (g)	M1	612,3
Massa do picnómetro contendo o provete de agregado saturado (g)	M2	1622,9
Temperatura da água de M2 (ºC)	-	16,4
Massa do picnómetro apenas cheio de água (g)	M3	1246,7
Temperatura da água de M3 (ºC)	-	16,4
Massa do provete seco em estufa (g)	M4	605,2
Massa volúmica da água a (22±3)ºC (Mg/m3)	ρω	0,9989
Massa volúmica do material impermeável das partículas (Mg/m3)	ρa	2,64
Massa volúmica das partículas secas em estufa (Mg/m3)	ρrd	2,56
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (Mg/m3)	ρssd	2,59
Absorção de água após imersão durante 24 horas (%)	WA24	1,2
Vertificação dos cálculos (Mg/m3)	ρssd	2,59

Granulado de Cortiça 2-9

Método do picnómetro para partículas de agregados leves			
Data de ensaio: 31-03-2009			
Amostra			
Descrição da amostra: Granulado de Cortiça 2-9			
Máxima dimensão do agregado da amostra (mm)		9,52	
O ensaio é realizado com 2 provetes com volume individual entre 0,5 l e 0,6 l		Provete	
		1	2
		0,5 l	0,5 l
Picnómetro com funil de vidro e grelha flexível			
Volume do picnómetro (entre 500 ml a 5000 ml)		1000 ml	
Calibração do Picnómetro			
Massa do picnómetro seco mais funil e grelha (g)		Mp	384,3
Picnómetro cheio de água até ao traço de referência do funil (g)		M	1579,3
Massa volúmica da água à temperatura de calibração (17^{o}c)		ρω	0,9988
Massa volúmica da água corrigida (kg/m3) (Vp=(M-Mp)/ρω)		Vp	1196,44
		Provete	
		1	2
Massa do picnómetro seco mais funil e grelha (g)	m1	384,3	384,3
Massa do picnómetro contendo o provete de agregado seco + grelha (g)	m2	406,4	416,5
Massa do picnómetro cheio de água com grelha e provete (g) (medição inicial M5)	M5	1467,5	1398,3
(medição após 2 horas M2)	M2	1467,5	1399,9
(medição final após 24 horas M24)	MF	1469,2	1403,5
Massa do provete com superfície seca (após medição final)	Mw	27,7	47,5
Massa volúmica do material impermeável das partículas (após medição final) (Mg/m3)	ρa	0,160	0,144
Massa volúmica do material impermeável das partículas (MF) (Mg/m3)	ρa	0,15	
Absorção de água após imersão inicial (%)	W1	24,5	
Absorção de água após imersão de 2 horas (%)	W2	27,0	
Absorção de água após imersão de 24 horas (%) (após medição final)	WF	36,4	

Argex 2-4

Método do picnómetro para partículas de agregados leves			
Data de ensaio: 07-04-2009			
Amostra			
Descrição da amostra: Argex 2-4			
Máxima dimensão do agregado da amostra (mm)		6,35	
O ensaio é realizado com 2 provetes com volume individual entre 0,5 l e 0,6 l		Provete	
		1	2
		0,5 l	0,5 l
Picnómetro com funil de vidro e grelha flexível			
Volume do picnómetro (entre 500 ml a 5000 ml)		1000 ml	
Calibração do Picnómetro			
Massa do picnómetro seco mais funil e grelha (g)		Mp	350,3
Picnómetro cheio de água até ao traço de referência do funil (g)		M	1498,6
Massa volúmica da água à temperatura de calibração (17^{o}c)		ρω	0,9988
Massa volúmica da água corrigida (kg/m3) (Vp=(M-Mp)/ρω)		Vp	1149,68
		Provete	
		1	2
Massa do picnómetro seco mais funil e grelha (g)	m1	350,3	350,1
Massa do picnómetro contendo o provete de agregado seco + grelha (g)	m2	395,6	438,9
Massa do picnómetro cheio de água com grelha e provete (g) (medição inicial M5)	M5	1486,6	1473,8
(medição após 2 horas M2)	M2	1487,7	1475,8
(medição final após 24 horas M24)	MF	1490,5	1480,6
Massa do provete com superfície seca (após medição final)	Mw	55,1	111,9
Massa volúmica do material impermeável das partículas (após medição final) (Mg/m3)	ρa	0,716	0,683
Massa volúmica do material impermeável das partículas (MF) (Mg/m3)	ρa	0,70	
Absorção de água após imersão inicial (%)	W1	15,7	
Absorção de água após imersão de 2 horas (%)	W2	18,0	
Absorção de água após imersão de 24 horas (%) (após medição final)	WF	23,8	

Pedra-pomes

Método do picnómetro para partículas de agregados leves			
Data de ensaio: 22-04-2009			
Amostra			
Descrição da amostra: Pedra-pomes			
Máxima dimensão do agregado da amostra (mm)		6,35	
O ensaio é realizado com 2 provetes com volume individual entre 0,5 l e 0,6 l		Provete	
		1	2
		0,6 l	0,6 l
Picnómetro com funil de vidro e grelha flexível			
Volume do picnómetro (entre 500 ml a 5000 ml)		1000 ml	
Calibração do Picnómetro			
Massa do picnómetro seco mais funil e grelha (g)		Mp	349,7
Picnómetro cheio de água até ao traço de referência do funil (g)		M	1500,1
Massa volúmica da água à temperatura de calibração (18^{o}c)		ρω	0,9986
Massa volúmica da água corrigida (kg/m3) (Vp=(M-Mp)/ρω)		Vp	1152,01
		Provete	
		1	2
Massa do picnómetro seco mais funil e grelha (g)	m1	349,7	350
Massa do picnómetro contendo o provete de agregado seco + grelha (g)	m2	474,5	476,2
Massa do picnómetro cheio de água com grelha e provete (g) (medição inicial M5)	M5	1526,2	1524,5
(medição após 2 horas M2)	M2	1530	1527,7
(medição final após 24 horas M24)	MF	1542,8	1540,2
Massa do provete com superfície seca (após medição final)	Mw	193,1	205,7
Massa volúmica do material impermeável das partículas (após medição final) (Mg/m3)	ρa	0,829	0,761
Massa volúmica do material impermeável das partículas (MF) (Mg/m3)	ρa	0,79	
Absorção de água após imersão inicial (%)	W1	46,0	
Absorção de água após imersão de 2 horas (%)	W2	48,8	
Absorção de água após imersão de 24 horas (%) (após medição final)	WF	58,9	

ANEXO 4 – Resultados dos Ensaios dos Provetes

Tempo (horas)	Provete	Condição de exposição		% de água						Massa (g)	Perda de água/água total (%)	Velocidade de Secagem (g/h)
		normal	ventilado	0 cm	2 cm	4 cm	6 cm	8 cm	10 cm			
0 horas	BR 1-2	x		60	100	100	100	100	100	2259,90	0,00	0,00
	BR 3-4		x	47,5	100	100	100	100	100	2251,00	0,00	0,00
	BLGC 1-2	x		67,5	100	100	100	100	100	1221,10	0,00	0,00
	BLGC 3-4		x	52,5	100	100	100	100	100	1215,55	0,00	0,00
	BLAE 1-2	x		80	100	100	100	100	100	1528,91	0,00	0,00
	BLAE 3-4		x	80	100	100	100	100	100	1511,34	0,00	0,00
	BLPP 1-2	x		100	100	100	100	100	100	1692,02	0,00	0,00
	BLPP 3-4		x	100	100	100	100	100	100	1682,07	0,00	0,00
72 horas	BR 1-2	x		35	85	100	100	100	100	2249,20	4,64	0,15
	BR 3-4		x	20	87,5	100	100	100	100	2239,15	5,14	0,16
	BLGC 1-2	x		25	85	100	100	100	100	1209,98	4,66	0,15
	BLGC 3-4		x	15	57,5	75	80	100	100	1203,76	4,94	0,16
	BLAE 1-2	x		42,5	100	100	100	100	100	1508,54	7,49	0,28
	BLAE 3-4		x	25	100	100	100	100	100	1490,10	7,81	0,30
	BLPP 1-2	x		100	100	100	100	100	100	1636,53	14,15	0,77
	BLPP 3-4		x	50	100	100	100	100	100	1599,54	21,04	1,15
120 horas	BR 1-2	x		22,5	77,5	85	97,5	100	100	2246,48	5,82	0,11
	BR 3-4		x	12,5	82,5	92,5	100	100	100	2236,13	6,45	0,12
	BLGC 1-2	x		15	72,5	90	100	100	100	1207,41	5,73	0,11
	BLGC 3-4		x	10	50	67,5	75	87,5	100	1200,83	6,16	0,12
	BLAE 1-2	x		35	92,5	100	100	100	100	1503,58	9,32	0,21
	BLAE 3-4		x	22,5	85	100	100	100	100	1484,54	9,86	0,22
	BLPP 1-2	x		62,5	100	100	100	100	100	1614,18	19,85	0,65
	BLPP 3-4		x	40	100	100	100	100	100	1587,35	24,15	0,79
168 horas	BR 1-2	x		20	62,5	72,5	82,5	92,5	100	2244,46	6,70	0,09
	BR 3-4		x	10	60	70	80	90	100	2233,72	7,50	0,10
	BLGC 1-2	x		12,5	67,5	75	92,5	100	100	1205,44	6,56	0,09
	BLGC 3-4		x	7	37,5	62,5	67,5	80	97,5	1198,44	7,16	0,10
	BLAE 1-2	x		32,5	85	100	100	100	100	1499,99	10,63	0,17
	BLAE 3-4		x	20	75	90	100	100	100	1479,18	11,83	0,19
	BLPP 1-2	x		55	100	100	100	100	100	1604,16	22,40	0,52
	BLPP 3-4		x	35	97,5	100	100	100	100	1579,17	26,24	0,61
240 horas	BR 1-2	x		17,5	55	65	75	87,5	97,5	2241,96	7,78	0,07
	BR 3-4		x	10	50	60	70	80	95	2230,99	8,68	0,08
	BLGC 1-2	x		12,5	60	70	80	95	100	1203,07	7,55	0,08
	BLGC 3-4		x	7	27,5	47,5	57,5	70	90	1195,75	8,29	0,08

	BLAE 1-2	x		30	80	90	100	100	100	1496,01	12,10	0,14
	BLAE 3-4		x	15	67,5	80	92,5	100	100	1475,16	13,31	0,15
	BLPP 1-2	x		45	92,5	100	100	100	100	1595,37	24,64	0,40
	BLPP 3-4		x	30	82,5	100	100	100	100	1570,74	28,39	0,46
288 horas	BR 1-2	x		17,5	55	65	72,5	77,5	82,5	2240,28	8,51	0,07
	BR 3-4		x	10	47,5	60	70	80	95	2229,06	9,52	0,08
	BLGC 1-2	x		12,5	60	67,5	75	90	100	1201,55	8,19	0,07
	BLGC 3-4		x	7	27,5	47,5	57,5	70	85	1193,81	9,10	0,08
	BLAE 1-2	x		30	70	80	90	100	100	1493,87	12,89	0,12
	BLAE 3-4		x	15	57,5	70	77,5	92,5	100	1472,56	14,26	0,13
	BLPP 1-2	x		42,5	77,5	90	100	100	100	1591,22	25,70	0,35
	BLPP 3-4		x	30	72,5	87,5	100	100	100	1566,54	29,46	0,40
336 horas	BR 1-2	x		17,5	55	65	70	75	80	2238,81	9,15	0,06
	BR 3-4		x	10	47,5	60	70	77,5	85	2227,26	10,30	0,07
	BLGC 1-2	x		12,5	60	67,5	75	82,5	90	1200,13	8,78	0,06
	BLGC 3-4		x	7	25	47,5	57,5	70	80	1191,98	9,87	0,07
	BLAE 1-2	x		30	62,5	72,5	85	95	100	1491,75	13,66	0,11
	BLAE 3-4		x	15	50	62,5	72,5	85	100	1469,97	15,21	0,12
	BLPP 1-2	x		40	75	90	100	100	100	1587,27	26,71	0,31
	BLPP 3-4		x	30	65	80	95	100	100	1562,49	30,49	0,36
408 horas	BR 1-2	x		17,5	50	60	67,5	72,5	80	2236,86	9,99	0,06
	BR 3-4		x	10	47,5	60	70	75	80	2224,87	11,33	0,06
	BLGC 1-2	x		12,5	57,5	65	70	77,5	85	1198,32	9,54	0,06
	BLGC 3-4		x	7	25	47,5	57,5	67,5	75	1189,56	10,88	0,06
	BLAE 1-2	x		30	60	67,5	80	90	100	1488,76	14,77	0,10
	BLAE 3-4		x	15	47,5	62,5	70	85	100	1466,38	16,54	0,11
	BLPP 1-2	x		40	70	80	95	100	100	1582,03	28,04	0,27
	BLPP 3-4		x	30	57,5	75	90	100	100	1557,13	31,85	0,31
456 horas	BR 1-2	x		17,5	50	60	70	75	80	2235,74	10,48	0,05
	BR 3-4		x	10	47,5	60	70	75	80	2223,51	11,92	0,06
	BLGC 1-2	x		10	50	60	65	70	80	1197,26	9,98	0,05
	BLGC 3-4		x	7	22,5	47,5	57,5	65	72,5	1188,22	11,44	0,06
	BLAE 1-2	x		30	55	62,5	70	80	100	1486,85	15,47	0,09
	BLAE 3-4		x	15	42,5	62,5	67,5	75	82,5	1464,26	17,31	0,10
	BLPP 1-2	x		40	65	72,5	82,5	95	100	1579,14	28,78	0,25
	BLPP 3-4		x	30	50	70	85	95	100	1554,00	32,65	0,28
504 horas	BR 1-2	x		17,5	47,5	57,5	67,5	72,5	77,5	2234,57	10,98	0,05
	BR 3-4		x	10	47,5	60	70	75	80	2222,12	12,53	0,06
	BLGC 1-2	x		10	47,5	60	65	70	80	1196,10	10,46	0,05
	BLGC 3-4		x	7	22,5	42,5	57,5	65	72,5	1186,79	12,04	0,06
	BLAE 1-2	x		30	52,5	60	70	75	90	1485,32	16,03	0,09
	BLAE 3-4		x	15	37,5	50	60	67,5	75	1461,93	18,17	0,10
	BLPP 1-2	x		37,5	62,5	67,5	80	92,5	100	1576,33	29,50	0,23

	BLPP 3-4		x	30	45	65	75	85	100	1550,90	33,44	0,26
576 horas	BR 1-2	x		17,5	45	57,5	65	70	75	2232,81	11,75	0,05
	BR 3-4		x	10	47,5	55	65	70	77,5	2220,08	13,41	0,05
	BLGC 1-2	x		10	47,5	60	65	70	75	1194,45	11,16	0,05
	BLGC 3-4		x	7	17,5	40	60	62,5	67,5	1184,68	12,92	0,05
	BLAE 1-2	x		20	45	52,5	60	65	80	1483,57	16,68	0,08
	BLAE 3-4		x	15	30	47,5	57,5	67,5	72,5	1459,22	19,17	0,09
	BLPP 1-2	x		32,5	57,5	62,5	75	87,5	100	1573,10	30,32	0,21
	BLPP 3-4		x	25	37,5	60	67,5	82,5	97,5	1546,79	34,49	0,23
624 horas	BR 1-2	x		17,5	42,5	57,5	65	70	75	2231,76	12,21	0,05
	BR 3-4		x	10	47,5	55	65	70	75	2218,79	13,97	0,05
	BLGC 1-2	x		10	45	60	65	70	75	1193,42	11,59	0,04
	BLGC 3-4		x	7	17,5	35	50	55	60	1183,36	13,47	0,05
	BLAE 1-2	x		20	42,5	50	60	65	80	1482,72	16,99	0,07
	BLAE 3-4		x	15	30	45	55	65	72,5	1457,34	19,86	0,09
	BLPP 1-2	x		32,5	57,5	62,5	75	87,5	100	1571,30	30,78	0,19
	BLPP 3-4		x	25	35	55	62,5	77,5	90	1544,92	34,97	0,22
672 horas	BR 1-2	x		17,5	42,5	57,5	62,5	67,5	72,5	2230,70	12,66	0,04
	BR 3-4		x	10	47,5	55	65	70	75	2217,51	14,52	0,05
	BLGC 1-2	x		10	37,5	52,5	60	67,5	72,5	1192,41	12,01	0,04
	BLGC 3-4		x	7	17,5	35	50	55	60	1182,06	14,02	0,05
	BLAE 1-2	x		20	40	47,5	55	62,5	75	1480,02	17,98	0,07
	BLAE 3-4		x	12,5	25	42,5	50	60	70	1455,35	20,59	0,08
	BLPP 1-2	x		30	57,5	62,5	72,5	82,5	95	1568,93	31,39	0,18
	BLPP 3-4		x	25	32,5	50	57,5	72,5	82,5	1542,09	35,69	0,21
744 horas	BR 1-2	x		15	37,5	52,5	60	65	70	2229,40	13,23	0,04
	BR 3-4		x	7	47,5	55	62,5	67,5	75	2215,86	15,24	0,05
	BLGC 1-2	x		8,5	35	50	57,5	65	70	1191,16	12,53	0,04
	BLGC 3-4		x	5	15	30	45	52,5	57,5	1180,37	14,73	0,05
	BLAE 1-2	x		20	35	42,5	50	57,5	70	1477,41	18,94	0,07
	BLAE 3-4		x	10	20	37,5	42,5	52,5	60	1453,36	21,32	0,08
	BLPP 1-2	x		30	52,5	60	67,5	77,5	85	1566,55	31,99	0,17
	BLPP 3-4		x	22,5	27,5	42,5	52,5	62,5	72,5	1539,27	36,41	0,19

ANEXO 5 – Relatório de Peneiração (brita 0)

RELATÓRIO DE ENSAIO DE PENEIRAÇÃO

NP EN 933-1 — N.º da Amostra: 099/09

Identificação do Agregado: Brita 0 (2/5) - Penafiel - Agrepor

Data da Recolha: 16/03/09 — Local da Recolha: C. P. Gondomar

Data de Ensaio: 19/03/09 — Procedimento: ☑ Lavagem e peneiração ☐ Outro

Distribuição granulométrica

Peneiro (mm)	Material retido: R_i (g)	r_i (%)	Passado acumulado (%)
80	0	0	100
63	0	0	100
40	0	0	100
31,5	0	0	100
20	0	0	100
16	0	0	100
14	0	0	100
12,5	0	0	100
10	0	0	100
8	0	0	100
6,3	13,3	1	99
4	496,7	33	66
2	836,6	55	11
1	104,3	7	4
0,5	25,6	2	2
0,25	14,0	1	1
0,125	6,7	0	1
0,063	4,7	0	0,5
Fundo: P	0,7	0,0	
Total	1504,6	0	

Lavagem

Massa seca total: M_1 (g): 1512,0

Massa seca após lavagem: M_2 (g): 1504,7

Massa seca dos finos removidos por lavagem: $M_1 - M_2$ (g): 7,3

Teor de finos

Percentagem de finos, f, que passam no peneiro 0,063 mm: 0,5

Parâmetros de controlo

Módulo de Finura: MF: 5,14

Centro de Finura: CF: 5,30

Verificação:

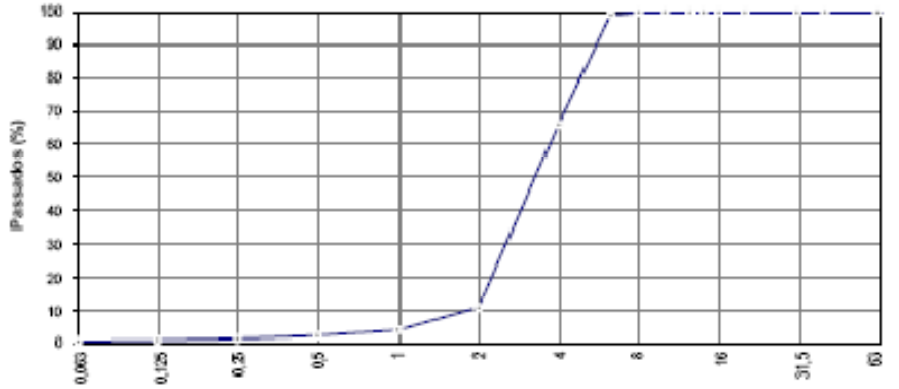
$(M_2 - (\Sigma R_i + P)) / M_2 \times 100 < 1\ \%$ — Verifica

Equipamento utilizado

Balança: BAL 001

Estufa: EST 020

Peneiros: PEN 284; PEN 285; PEN 286; PEN 287; PEN 288; PEN 289; PEN 290; PEN 291



Observações: Ensaio efectuado no Laboratório Central

O Técnico: Carlos Furtado

LAB.17.1